



Titre: DIFFAMC: Un mécanisme de différenciation de fiabilité pour un canal sans fil utilisant l'AMC
Title: sans fil utilisant l'AMC

Auteur: Sami Ben Guedria
Author:

Date: 2012

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Ben Guedria, S. (2012). DIFFAMC: Un mécanisme de différenciation de fiabilité pour un canal sans fil utilisant l'AMC [Master's thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/809/>
Citation:

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/809/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Brunilde Sanso, & Jean-François Frigon
Advisors:

Programme: Génie Électrique
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

DIFFAMC: UN MÉCANISME DE DIFFÉRENCIATION DE FIABILITÉ POUR UN
CANAL SANS FIL UTILISANT L'AMC

SAMI BEN GUEDRIA
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE ÉLECTRIQUE)
AVRIL 2012

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

DIFFAMC: UN MÉCANISME DE DIFFÉRENCIATION DE FIABILITÉ POUR UN
CANAL SANS FIL UTILISANT L'AMC

présenté par : BEN GUEDRIA, Sami

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès Sciences Appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. CARDINAL, Christian, Ph.D., président.

Mme. SANSÒ, Brunilde, Ph.D., membre et directrice de recherche.

M. FRIGON, Jean-François, Ph.D., membre et codirecteur de recherche.

M. GIRARD, André, Ph.D., membre.

À mes parents . . .

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à mes directeurs de recherche, les Dr Brunilde Sansò et Dr Jean-François Frigon pour leurs orientations et directives académiques, ainsi que pour leur soutien financier au cours de mon travail de maîtrise de recherche.

Je remercie tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu porter à ce travail en acceptant de l'évaluer. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma haute gratitude.

Je remercie particulièrement tous les membres de ma famille pour leur soutien et encouragement.

Je remercie également mes collègues du laboratoire GERAD à l'École Polytechnique, pour leur aide et leurs conseils durant la période de ma recherche. Je citerais pour mémoire Denisse, Olfa, Hakim, Mohamed, Jihed, Asma, Aida et Federico.

Enfin, je remercie tout le personnel du GERAD techniciens et administratifs, sans oublier notre chère Ginette Desparois au département génie électrique.

RÉSUMÉ

De nos jours, les technologies sans fil sont omniprésentes dans notre quotidien. Les nouveaux standards de 4^e générations, WiMAX et LTE, offrent un niveau de performance comparable à celui des réseaux filaires. Les nouveaux terminaux mobiles sont désormais capables de gérer pratiquement tous les types d'applications. En effet, ils permettent non seulement d'avoir des communications téléphoniques, mais aussi de naviguer sur internet, de regarder des vidéos, de faire de la vidéo-conférence, de jouer en ligne, de partager les fichiers, etc. Par ailleurs, l'utilisation des terminaux mobiles ne se limite plus à une utilisation personnelle. Désormais, de plus en plus d'entreprises équipent leurs employés de téléphones intelligents. En effet, les téléphones sont devenus un outil de travail offrant la mobilité et l'accès à l'information temps réel.

Les systèmes de communication modernes doivent gérer non seulement plusieurs types d'applications, mais aussi plusieurs types d'utilisateurs. Par conséquent, tous les standards offrent de nombreuses classes de qualité de service (QoS) capables de satisfaire les contraintes imposées par les applications. Néanmoins, aucun standard n'a prévu le support de la différenciation de fiabilité (DiR) afin d'offrir à chaque utilisateur le niveau de fiabilité adéquat. En fait, ils offrent tous un niveau de fiabilité unique.

La différenciation de fiabilité est d'autant plus importante dans un contexte sans fil. En effet, le canal sans fil est sujet à la variation de la qualité du signal reçu, qui résulte de la mobilité de l'utilisateur et du phénomène multitrajet. Cette variation de la qualité du canal entraîne souvent des erreurs de transmission. Pour de l'utilisateur, ces erreurs se traduisent couramment par des coupures lors des communications téléphoniques, des pertes de l'image et du son dans le cas de la vidéo et un débit très bas pour les données. Ces erreurs sont aussi souvent la cause de la perte de la communication. Bien qu'un utilisateur normal puisse aisément tolérer de petites pertes de signal, un professionnel serait moins enclin à accepter cela. La différenciation de fiabilité permet d'offrir exactement à chaque utilisateur du réseau sans fil le niveau de fiabilité dont il a besoin.

Dans ce mémoire de maîtrise, nous présentons DiffAMC ; un nouveau mécanisme de différenciation de fiabilité pour les réseaux sans fil. DiffAMC utilise d'une façon innovante la technique d'adaptation de la modulation et du codage (AMC) afin d'offrir plusieurs niveaux de fiabilité. L'AMC est une technique de transmission très largement utilisée dans tous les nouveaux standards de communication sans fil. À notre connaissance, aucune autre méthode n'utilise l'AMC pour faire de la différenciation. De plus, DiffAMC est conçu pour pouvoir s'intégrer très facilement dans n'importe quel système de communications utilisant l'AMC.

Dans un premier temps, nous présentons le canal sans fil, les techniques d'adaptation de lien et le principe de l'AMC. Par la suite, nous détaillons le fonctionnement du mécanisme DiffAMC. Les performances de deux sous-couches le constituant sont évaluées. Afin de valider les performances de DiffAMC en termes de différenciation, nous avons développé une plateforme de simulation basée sur le simulateur de réseaux ns-2. Le module développé, PolyMAX, est capable de simuler un réseau WIMAX mobile avec le support d'un canal physique réaliste. Les simulations que nous avons entreprises ont validé le potentiel de DiffAMC en matière de différenciation. Sur les 32 niveaux de différenciation que nous avons considérés dans nos simulations, le gain moyen du taux de perte de paquets (PER) entre deux niveaux successifs est de 20%. En contrepartie, le taux d'occupation des ressources n'augmente que de 5% en moyenne. Finalement, les niveaux de différenciation sont analysés, et un scénario de déploiement de DiffAMC est proposé.

ABSTRACT

Nowadays, wireless technologies are constantly present in our everyday life. Moreover, fourth-generation standards (WiMAX and LTE) are capable of providing the same level of performance as wired networks. Mobile devices are now able to manage almost every kind of application. In fact, besides calling, it is now possible to surf the Internet, watch videos, play online, share files, make video-conference calls and so forth. Furthermore, mobile device usage is no longer limited to personal purposes. What is more, an increasing number of enterprises currently provide its employees with smartphones. Indeed, mobile phones are nowadays a business tool which offers mobility and real time access to information.

Modern communication systems have to manage not only different kinds of applications but different kinds of users. Therefore, standards are now offering numerous classes of Quality of Service (QoS) to satisfy applications constraints. Nevertheless, none of these standards were planned to support Differentiated Reliability (DiR) which offers users different levels of reliability. In fact, they all offer a single level of reliability.

Differentiated reliability is as important in a wireless context as QoS. In effect, wireless channels are subject to quality variation of the received signal due to user mobility and multiple path phenomenon. In fact, variations of channel quality frequently cause transmission errors. In consequence, users suffer from poor call quality, loss of image and sound in the case of video and low throughput for data transmissions. Moreover, these errors are also the cause for most missed communications. Even though most users can tolerate small losses of signal, a business user would be less willing to accept it. Differentiated reliability makes possible the allocation of the level of reliability that each user of a wireless network needs.

In this Master thesis, we introduce DiffAMC; a novel mechanism of differentiated reliability in wireless systems. DiffAMC is an innovative manner of using Adaptive Modulation and Coding technique (AMC), to offer different levels of reliability. AMC is a transmissions technique which is widely used in most recent wireless communication standards. As far as we know, DiffAMC is the sole mechanism that uses AMC to obtain differentiation. Besides, DiffAMC was developed to be easily integrated in every communication system that uses AMC. First, we present the wireless channel, link adaptation technique and AMC principles. Second, we elaborate on the operation of DiffAMC mechanism. Moreover, performance of the two sub layers of DiffAMC is evaluated. What is more, in order to evaluate the performance of DiffAMC in terms of differentiation, we have developed a simulation platform based on the network simulator ns-2. The module PolyMAX, that we developed, makes possible the simulation of a WiMAX mobile network with the support of a realistic physical

channel. Furthermore, DiffAMC has proven its potential value on the different simulations that it undertook on terms of differentiation. In fact, on the 32 levels of differentiation that we have considered in simulations, the mean gain of PER between two successive layers is 20%. Nonetheless, the mean percentage of resource usage only increases by 5%. Finally, the differentiated levels were analyzed, and a deployment scenario is proposed.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xii
LISTE DES FIGURES	xiii
LISTE DES ANNEXES	xv
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xvi
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
CHAPITRE 2 LES TECHNIQUES D'ADAPTATION DE LIENS POUR UN CANAL	
SANS FIL	5
2.1 Introduction	5
2.2 Canal sans fil	5
2.2.1 Description du canal sans fil	5
2.2.2 Canal de Rayleigh	9
2.3 Modélisation du canal sans fil	10
2.4 Techniques d'adaptation de lien	13
2.4.1 Adaptation de la Modulation et du Codage (AMC)	14
2.5 Conclusion	17
CHAPITRE 3 DIFFÉRENCIATION DU NIVEAU DE FIABILITÉ DANS UN CANAL	
SANS FIL	18
3.1 Introduction	18
3.2 Différenciation par classe AMC	20
3.2.1 Problématique	20

3.2.2	Conception	21
3.2.3	Évaluation des performances	21
3.3	Différenciation par AMC intelligent	24
3.3.1	Problématique	24
3.3.2	Conception	27
3.3.3	Évaluation des performances	31
3.4	DiffAMC	41
3.5	Conclusion	47
CHAPITRE 4 PLATEFORME DE SIMULATION		48
4.1	Introduction	48
4.2	Simulateur de réseaux ns-2	48
4.2.1	Description de ns-2	49
4.2.2	Limitations de ns-2	49
4.3	Intégration du support du canal sans fil dans PolyMAX	50
4.3.1	Implémentation du canal sans fil	50
4.3.2	Génération des fichiers du canal et des MCS	56
4.3.3	Implémentation du mécanisme DiffAMC	57
4.4	Analyse des résultats obtenus avec ns-2	60
4.5	Modèles de trafic	60
4.5.1	Trafic de voix	61
4.5.2	Trafic de vidéo	61
4.5.3	Trafic de données	62
4.6	Conclusion	62
CHAPITRE 5 SIMULATIONS ET ANALYSE DES RÉSULTATS		64
5.1	Introduction	64
5.2	Plan d'expérience	64
5.2.1	Scénario	64
5.2.2	Paramètres de la simulation	66
5.3	Résultats des simulations	67
5.3.1	Taux de perte de paquets	67
5.3.2	Taux d'occupation de la bande passante	70
5.4	Analyse et propositions	73
5.4.1	Analyse des résultats	73
5.4.2	Proposition de déploiement	78
5.5	Conclusion	78

CHAPITRE 6 CONCLUSION	80
RÉFÉRENCES	82
ANNEXES	88

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Schémas de modulation et codage (MCS)	15
Tableau 2.2	Partitionnement du SNR en fonction des MCS pour un BER_{max} de 10^{-5}	17
Tableau 3.1	Seuils de changement par classe AMC	21
Tableau 3.2	Paramètres de la simulation	22
Tableau 3.3	Paramètres de la simulation	33
Tableau 3.5	Schéma de différenciation par AMC intelligent.	43
Tableau 4.1	Sommaire des fonctionnalités de PolyMAX.	51
Tableau 4.2	Exemple de trace ns-2 avec gestion du canal.	55
Tableau 4.3	Schémas de modulation et de codage (MCS) utilisés dans PolyMAX . .	57
Tableau 4.4	Caractéristiques du trafic MPEG-4 utilisé (source : [27])	63
Tableau 5.1	Les Classes de différenciation AMC.	65
Tableau 5.2	Schémas de différenciation par AMC intelligent.	66
Tableau 5.3	Schémas de différenciation DiffAMC pour le trafic de voix après raffinage.	75
Tableau 5.4	Schémas de différenciation DiffAMC pour le trafic vidéo après raffinage.	76
Tableau 5.5	Schémas de différenciation DiffAMC pour le trafic de données après raffinage.	77
Tableau 5.6	Les niveaux de fiabilité proposés en fonction des niveaux DiffAMC. . .	79

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Évanouissement à petite et à grande échelle.	8
Figure 2.2	Exemples de la variation du SNR dans un canal Rayleigh, avec un rapport P_{tr}/σ_w^2 de 10 dB et une fréquence Doppler maximale de 25 Hz dans 2.2(a) et 50 Hz dans 2.2(b).	12
Figure 2.3	Schéma fonctionnel d'un système AMC.	15
Figure 2.4	BER en fonction du SNR pour différents schémas de modulation et codage.	16
Figure 3.1	Couche DiffAMC.	19
Figure 3.2	Taux de perte de paquets en fonction des classes AMC.	23
Figure 3.3	Débit utile par symbole en fonction des classes AMC.	25
Figure 3.4	Schéma fonctionnel d'un système de transmission utilisant l'AMC intelligent (source [14])	27
Figure 3.5	Comportement de l'AMC classique et AMC intelligent envers le problème de variation de CSI.	28
Figure 3.6	Schéma fonctionnel du moteur intelligent (source [14])	29
Figure 3.7	Disponibilité du canal(source [14]).	33
Figure 3.8	Taux de perte de paquets (source [14]).	35
Figure 3.9	Débit utile par symbole (source [14]).	35
Figure 3.10	Impact de la portée d'extrapolation sur le taux de perte de paquets. . .	37
Figure 3.11	Impact de la portée d'extrapolation sur le débit utile par symbole. . .	37
Figure 3.12	Impact du paramètre <i>offset</i> sur le taux de perte de paquets.	39
Figure 3.13	Impact du paramètre <i>offset</i> sur le débit utile par symbole.	39
Figure 3.14	Impact du seuil de défaillance sur le taux de perte de paquets.	40
Figure 3.15	Impact du seuil de défaillance sur le débit utile par symbole.	40
Figure 3.16	Impact du nombre maximal d'erreurs sur le taux de perte de paquets. .	42
Figure 3.17	Impact du nombre maximal d'erreurs sur le débit utile par symbole. .	42
Figure 3.18	Schéma fonctionnel de la couche DiffAMC.	44
Figure 3.19	Taux de perte de paquets pour les différentes combinaisons de différenciation DiffAMC.	45
Figure 3.20	Débit utile par symbole pour les différentes combinaisons de différenciation DiffAMC.	46
Figure 4.1	Estimation du PER d'un paquet.	51

Figure 4.2	Schéma fonctionnel de la méthode utilisée pour l'implémentation du canal sans fil.	54
Figure 4.3	BER en fonction du SNR pour les 7 MCS de WiMAX utilisés.	58
Figure 4.4	Schéma fonctionnel de la méthode utilisée pour l'implémentation du mécanisme DiffAMC.	59
Figure 4.5	Analyse des fichiers de sortie de ns-2.	61
Figure 5.1	Taux de perte de paquets pour le trafic de voix.	68
Figure 5.2	Taux de perte de paquets pour le trafic de vidéo.	69
Figure 5.3	Taux de perte de paquets pour le trafic de données.	70
Figure 5.4	Taux d'occupation de la bande passante pour le trafic de voix.	72
Figure 5.5	Taux d'occupation de la bande passante pour le trafic de vidéo.	72
Figure 5.6	Taux d'occupation de la bande passante pour le trafic de données.	73
Figure 5.7	Taux d'occupation de la bande passante en fonction du taux de perte de paquets pour le trafic de voix.	75
Figure 5.8	Taux d'occupation de la bande passante en fonction du taux de perte de paquets pour le trafic de vidéo.	76
Figure 5.9	Taux d'occupation de la bande passante en fonction du taux de perte de paquets pour le trafic de données.	77

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	INSTRUCTIONS DU SCRIPT NS-2	88
----------	---------------------------------------	----

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AF	Assured Forwarding
AMC	Adaptive Modulation and Coding
ARP	Address Resolution Protocol
ARQ	Automatic Repeat reQuest
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BE	Best Effort
BER	Bit Error Rate
BER_{max}	BER maximal
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BS	Base Station
CBR	Constant Bit Rate
CoV	Covariance
CSI	Channel Station Information
D_B	Débit brute
D_s	Étalement fréquentiel
DL MAP	Downlink Media Access Protocol
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
EE	Extrapolation Engine
EF	Expedited Forwarding
ertPS	Extended Real-Time Polling Service
F_d	Fréquence Doppler maximale
FDD	Frequency Division Duplex
FGN	Filtered Gaussian Noise
FIR	Finite impulse response
FSK	Frequency-shift keying
γ	SNR instantané
γ_{pred}	SNR prédit
GSM	Global System for Mobile Communications
h	Gain du canal
HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access
IE	Intelligent Engine
IIR	Infinite impulse response
IP	Internet Protocol

λ	Longueur d'onde
L	Taille de paquet
LTE	Long Term Evolution
MCS	Modulation and Coding Scheme
MMSE	Minimum Mean Square Error
MPEG-4	Moving Picture Experts Group
MTBF	Mean Time Between Failures
MTTR	Mean Time To Recover
N_0	Bruit du canal
N_s	Nombre de symboles
nrtPS	Non Real-Time Polling Service
ns-2	Network Simulator 2
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
OTcl	Object-oriented Tool Command Language
P	Puissance reçue
\hat{p}	PER mesuré
P_{tr}	Puissance de transmission moyenne
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PER	Packet Error Rate
PER_{max}	PER maximal
PMP	Point-to-Multi-Point
PSK	Phase-shift keying
PUCCH	Physical Uplink Control Channel
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoR	Quality of Reliability
QoS	Quality of Service
RAM.	Random Access Memory
rtPS	Real-Time Polling Service
σ_w^2	Variance du bruit gaussien
s_{pred}	MCS prédit
$S(f)$	Densité spectrale de puissance
SC	Single Carrier
SE	Stochastic Engine
SNR	Signal to Noise Ratio
SoS	Sum of Sinusoids

SS	Subscriber Station
T	Taux de codage
T_c	Temps de cohérence
TC	Turbo Codes
TCP	Transmission Control Protocol
TDD	Time Division Duplex
TTI	Time Transmission Interval
UDP	User Datagram Protocol
UGS	Unsolicited Grant Service
UL MAP	Uplink Media Access Protocol
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VoIP	Voice over IP
V	Vitesse du mobile
w	Bruit AWGN
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Le réseau Internet est incontestablement le réseau de communication le plus utilisé. Au fil des années, Internet a beaucoup gagné en notoriété. De plus en plus de personnes l'utilisent aussi bien à des fins personnelles que professionnelles. Internet était essentiellement basé sur un réseau filaire et des connexions à bas débit. Plus tard, nous avons assisté à une augmentation incessante du débit de transmission, et l'ajout d'utilisateurs mobiles utilisant les services d'internet. Cette tendance a été maintenue et amplifiée par l'introduction des fibres optiques à la place des câbles coaxiaux dans les réseaux de transport et plus tard dans les réseaux de distribution, et actuellement jusqu'à l'utilisateur final. De plus, le développement des réseaux cellulaires à large bande a contribué à soutenir cette croissance pour les utilisateurs mobiles. En effet, les nouveaux standards de 4^e générations comme le WiMAX [4] et le LTE [5] offrent des débits comparables à ceux des connexions filaires. Cette augmentation du débit et de la qualité a ouvert la voie à l'utilisation d'applications dont le contenu est de plus en plus riche, diversifié et complexe. Aujourd'hui, plusieurs types d'applications qui utilisaient traditionnellement des réseaux dédiés transitent via Internet. Des applications aussi diversifiées que la voix, la vidéo temps réel, le courriel, l'échange de données, le web et les jeux en temps réel utilisent l'Internet comme support de communications. Récemment, l'introduction de l'informatique en nuages (Cloud Computing) va générer encore plus de trafic, de diversité de service et surtout de nouvelles contraintes. Toutes ces applications ont des exigences très différentes en termes de qualité de service. Le problème est que le protocole Internet n'a pas été conçu pour offrir plusieurs niveaux de qualité de service, ou encore un contrôle d'admission. En effet, tous les flux sont traités de la même manière, en essayant toutefois d'offrir le meilleur service possible. Pour pallier ce problème, plusieurs nouveaux concepts ont été introduits comme les mécanismes Intserv, DiffServ [36] et la différenciation de la fiabilité [29, 13]. Le concept de la différenciation de fiabilité (DiR, Differentiated Reliability) permet à un réseau de fournir plusieurs niveaux de fiabilité afin de satisfaire les besoins requis par chaque flux de données, tout en minimisant le coût global de l'utilisation des ressources. Un système de communications qui n'utilise pas la différenciation doit fixer un niveau de fiabilité qui satisfait tous les types de flux. Par conséquent, le niveau de fiabilité sera celui qui correspond au flux le plus exigeant. En agissant de la sorte, les flux les moins exigeants auront un niveau de fiabilité supérieur à leurs besoins, ce qui implique un gaspillage des ressources. De l'autre côté, en diminuant le niveau de fiabilité pour économiser les ressources, les flux

les plus exigeants risquent de ne pas fonctionner correctement. Ainsi, la différenciation de fiabilité est un aspect très important de la conception des systèmes de communication. Elle permet de maximiser la capacité tout en respectant les besoins de chaque type de flux.

Problématique

Les réseaux cellulaires de nouvelle génération, à savoir le WiMAX et le LTE, intègrent tous le support de la qualité de service. En effet, plusieurs classes ont été prévues afin de gérer correctement différents types d'applications. Néanmoins, aucun standard sans fil, à notre connaissance, n'a prévu le support de la différenciation de fiabilité. Le plus important est que l'utilisation de la différenciation de fiabilité nous permettra de faire des économies de bande passante, qui est une ressource très limitée pour les réseaux sans fil. En effet, contrairement à un réseau filaire dont on peut augmenter facilement la capacité en installant des liens physiques supplémentaires, les réseaux sans fil doivent se soumettre à des réglementations strictes concernant l'utilisation du spectre des fréquences. De plus, le support de la différenciation au niveau de l'interface radio permettra de réaliser une différenciation de fiabilité de bout en bout, ce qui n'est pas possible actuellement. L'utilisation de la différenciation de fiabilité sur un lien sans fil est très différente par rapport à son utilisation sur un réseau filaire. Dans les réseaux filaires, la différenciation de fiabilité est généralement déployée pour pallier les pannes qui peuvent survenir dans le réseau. La différenciation permet aux flux prioritaires de minimiser les pertes malgré les pannes qui peuvent survenir. Étant donné qu'un lien filaire en panne ne peut rien transmettre, la différenciation est souvent basée sur l'utilisation des chemins de secours (redondant) ou plusieurs chemins possibles [12].

Dans le cas des réseaux sans fil, le lien radio impose des contraintes supplémentaires. En effet, les liens sans fil ont la particularité que leurs qualités varient énormément dans le temps. Ces contraintes sont d'autant plus importantes dans un réseau cellulaire, à cause de la mobilité des utilisateurs, du phénomène multitrajets et des interférences. En utilisant la technique d'adaptation de la modulation et du codage (AMC), cette variation de la qualité du lien se traduit par une variation du débit de la transmission et de la capacité du lien. Contrairement à un lien filaire dont la variation de capacité ne peut prendre que deux valeurs, soit une capacité totale en cas de bon fonctionnement, soit une capacité nulle en cas de panne, un lien sans fil a plutôt une capacité variable dans le temps à plusieurs niveaux. Par analogie avec la différenciation dans un réseau filaire, la différenciation de fiabilité dans un réseau sans fil devra permettre aux flux prioritaires de conserver un certain niveau de fiabilité de transmission quel que soit l'état du canal sans fil.

Objectif du mémoire

Le principal objectif de ce mémoire est de développer un mécanisme de différenciation de fiabilité pour les réseaux sans fil. Le mécanisme de différenciation doit être capable d'être utilisé sur un seul lien sans fil point à point, par exemple entre la station mobile et la station de base, ou encore entre deux stations mobiles dans le cas d'un réseau Mesh. De plus, le mécanisme proposé devrait être utilisable indépendamment de la technologie de la couche physique, et de la topologie (Mesh ou PMP (Point to MultiPoint)) du réseau. Néanmoins, le système sans fil qui l'intégrera doit permettre l'adaptation de la modulation et du codage, ce qui est le cas de tous les standards actuels.

Méthodologie

La méthodologie suivie dans notre projet de maîtrise a consisté, dans un premier temps, à faire une revue de littérature de la technique d'adaptation de la modulation et du codage (AMC) utilisée dans un environnement sans fil. Cette étape, nous a permis de dégager deux problèmes de l'AMC. Le premier est relatif à la contrainte de taux d'erreurs, et le deuxième concerne la variation de l'état du canal entre deux mesures. Nous avons proposé une solution pour chacun de ces problèmes. Ces deux problèmes ont été la base qui nous a permis de concevoir le mécanisme de différenciation de fiabilité que nous avons appelé DiffAMC. Dans la première étape de recherche et de conception, nous avons utilisé l'outil MATLAB pour mettre en œuvre et tester nos idées de façon très rapide. Une fois l'élaboration du mécanisme DiffAMC finalisée, nous sommes passés à l'étape de l'implémentation. Cette dernière étape consiste à évaluer les performances de DiffAMC en matière de différenciation de la fiabilité dans un environnement de simulation réaliste.

Principales contributions

Les principales contributions de ce projet de maîtrise sont :

- La conception de la technique de différenciation par classe AMC, permettant de résoudre le problème de contrainte de taux d'erreurs.
- La conception de la technique de l'AMC intelligent. Cette technique améliore les performances de l'AMC lors de la variation de l'état du canal entre deux mesures. Cette méthode a fait l'objet d'une publication dans une conférence [14].
- La conception du mécanisme DiffAMC pour la différenciation de fiabilité. DiffAMC est actuellement le seul mécanisme, à notre connaissance, qui propose une fiabilité différenciée en utilisant l'AMC.

- Le développement du module PolyMAX. Ce module, qui s'intègre dans le simulateur de réseaux ns-2, nous permet de simuler un réseau WiMAX avec, entre autres, la prise en charge de l'AMC, de la qualité de service, d'un canal sans fil et de DiffAMC. PolyMAX a aussi fait l'objet d'une publication dans une revue [15].

Organisation du mémoire

Le chapitre 2 présente les techniques d'adaptation de lien pour un canal sans fil. Nous commençons par une description des principales caractéristiques du canal sans fil à évanouissement et du canal Rayleigh. Par la suite, une revue de la littérature des techniques d'adaptation de lien et de la technique d'adaptation de modulation et de codage est présentée. Ce chapitre introduit les principes de bases nécessaires à la compréhension du fonctionnement du mécanisme DiffAMC. Le chapitre 3, constitue le thème central de ce mémoire dans lequel le mécanisme de différenciation de fiabilité DiffAMC est détaillé. Les deux sous-couches constituant ce mécanisme, la sous-couche de différenciation par classe AMC et la sous-couche de différenciation par AMC intelligent sont étudiées en détail. En effet, chaque sous-couche traite d'un problème particulier de l'AMC. Une revue de la littérature de l'AMC dans un canal à évanouissement est présentée. Les performances de chacune des sous-couches sont analysées et discutées. Finalement, le fonctionnement du mécanisme DiffAMC, utilisant un ensemble de 28 niveaux de différenciation, est simulé et les résultats sont analysés par la suite. Le chapitre 4 décrit la plateforme de simulation qui a été conçue et implémentée afin de valider les performances de DiffAMC dans un environnement réaliste. Dans un premier temps, le module de simulation de réseau WiMAX (appelé PolyMAX) est exposé. Par la suite, la méthodologie adoptée pour l'intégration du support d'un canal sans fil et du mécanisme DiffAMC est détaillée. Finalement, les modèles de trafic qui sont utilisés dans les simulations sont présentés. Le chapitre 5, expose les résultats des simulations réalisées afin de tester le mécanisme DiffAMC. Les résultats y sont analysés et commentés. Une proposition de déploiement de DiffAMC comprenant trois classes de différenciation par type de trafic est proposée. Finalement, le chapitre 6 présente une synthèse des principaux résultats obtenus ainsi que les limitations et les axes de recherches futures.

CHAPITRE 2

LES TECHNIQUES D'ADAPTATION DE LIENS POUR UN CANAL SANS FIL

Ce chapitre présente les principes de base nécessaires à la compréhension de notre travail. Après une brève introduction, la section 2.2 décrit brièvement les caractéristiques et paramètres du canal sans fil à évanouissement. Ensuite, le canal Rayleigh va être présenté en s'attardant principalement sur les paramètres qui vont nous être utiles pour la suite. Dans la section 2.3, une description de la modélisation de ce canal sera proposée. Finalement, la section 2.4 présente une petite revue de la littérature sur les techniques d'adaptation de lien et sur la technique d'Adaptation de Modulation et de Codage (AMC), qui est au centre de notre travail de recherche.

2.1 Introduction

Un système de communication utilisant le mécanisme de protection différenciée DiffAMC, est conçu pour travailler dans un environnement radio mobile. Il est donc utile de présenter les principales caractéristiques du canal sans fil. Par ailleurs, la performance de la méthode présentée va être étudiée via simulation, avec MATLAB dans un premier lieu, puis avec PolyMAX un simulateur de système WiMAX développé pour cet objectif. Afin de mieux comprendre le suite de notre travail, une modélisation du canal sans fil va être présentée, incluant les méthodes de génération d'un canal à évanouissement. Étant donné que DiffAMC est une évolution de l'AMC classique, nous allons présenter les techniques d'adaptation de lien en générale et de l'AMC en particulier.

2.2 Canal sans fil

2.2.1 Description du canal sans fil

Propagation radio mobile

Dans un système de communications, le signal reçu par le récepteur différera du signal transmis en raison de la dégradation subit durant la transmission. Cette dégradation est causée principalement par :

- L'affaiblissement ;
- Le bruit ;

- La réfraction ;
- La propagation multi-trajet.

L'affaiblissement est une conséquence de la perte de puissance du signal avec la distance. Pour les supports de transmission filaires, l'affaiblissement est une fonction exponentielle. Par contre pour les supports sans fil, l'affaiblissement est une fonction plus complexe qui dépend de la distance et des conditions atmosphériques. En plus de l'affaiblissement, le signal au récepteur est altéré par le bruit. Ce dernier englobe tous les signaux indésirables qui viennent s'ajouter au signal transmis ; à l'émetteur, lors de la propagation et au récepteur. Le bruit a de nombreuses sources : le bruit thermique (appelé aussi bruit blanc), le bruit d'intermodulation, le bruit provenant d'autres sources radio, le bruit en créneaux, la diaphonie, les orages, les éruptions solaires, etc. Les ondes radio subissent aussi une réfraction lors de leur propagation lié au changement de la vitesse de propagation des ondes en fonction des conditions atmosphériques. Par conséquent, le récepteur risque de ne recevoir qu'une fraction du signal direct. Dans le cas de la téléphonie mobile, les obstacles entre émetteur et récepteur font que le signal est réfléchi, et plusieurs copies du signal sont donc reçues avec des délais de propagation variables. Ce phénomène de multitrajets engendre une variation temporelle de l'enveloppe du signal, et provoque l'évanouissement du signal (fading en anglais). Le lecteur peut se référer à [59] pour plus de détails concernant la propagation sans fil.

L'évanouissement

Comme nous l'avons indiqué, l'évanouissement est une variation temporelle de la puissance du signal reçu. Dans un environnement statique, l'évanouissement est causé essentiellement par les changements atmosphériques comme la pluie, par exemple. Par contre dans un environnement mobile, l'emplacement du récepteur par rapport aux différents obstacles change dans le temps ce qui induit encore plus de complexité causée par les changements des chemins de transmission empruntés. En effet, trois phénomènes de propagation affectent le signal transmis lorsqu'il rencontre des obstacles, à savoir :

- La réflexion ;
- La diffraction ;
- La dispersion.

La réflexion a lieu lorsqu'une onde électromagnétique rencontre une surface dont la profondeur est plus grande que sa longueur d'onde. L'onde se réfléchit alors avec un angle égal à celui de l'angle d'incidence. La diffraction survient lorsqu'une onde atteint le coin d'une surface impénétrable (longueur d'onde plus petite que son épaisseur). L'onde incidente se propage dans deux directions différentes. Dans le cas où la longueur d'onde est supérieure ou égale à la taille de l'obstacle, l'onde est dispersée en plusieurs signaux de moindre puissance.

Dans un environnement de propagation mobile, nous pouvons distinguer deux types d'évanouissements, à grande et à petite échelle. Le premier est causé par la diminution de la puissance du signal avec la distance et par l'effet d'ombrage (shadowing en anglais) engendré par les immeubles ou par les variations du terrain. L'évanouissement à petite échelle est causé par les interférences constructives ou destructives des multitrajets. Il est très utile pour la conception des systèmes de communications sans fil. La figure 2.1 illustre ces phénomènes d'évanouissement. L'évanouissement à grande échelle est représenté par le trait discontinu et l'évanouissement à petite échelle par le trait continu.

Temps de cohérence

Un des paramètres les plus importants pour caractériser les variations à petite échelle du canal sans fil est le temps de cohérence. Ce paramètre va être largement utilisé dans ce mémoire. Par définition, le temps de cohérence est la période au-delà de laquelle le canal change de manière significative. Plus précisément, c'est la durée pendant laquelle les évanouissements du canal sont fortement corrélés.

Le temps de cohérence est inversement proportionnel à l'étalement fréquentiel (Doppler spread, en anglais) :

$$T_c \approx \frac{1}{D_s}$$

où T_c est le temps de cohérence et D_s est l'étalement fréquentiel.

L'étalement fréquentiel est la plus grande différence entre deux valeurs de fréquences Doppler :

$$D_s = \max_{(i,j)} |f_d(i) - f_d(j)|$$

où $f_d(i)$ est la fréquence Doppler maximale associée au chemin i .

La fréquence Doppler est le décalage de fréquence entre l'émetteur et le récepteur. Dans le cas simple où il n'y a qu'un seul chemin en ligne directe entre l'émetteur et le récepteur, la fréquence Doppler résulte seulement de la vitesse du mobile. Dans ce cas $f_d(i) = V/\lambda$, où V est la vitesse du mobile et λ la longueur d'onde. Dans le cas d'une propagation multitrajet, elle résulte de la variation de l'environnement physique. Ainsi, même si la vitesse du mobile est nulle, la fréquence Doppler ne l'est pas, et peut même être très élevée. Par exemple, si le récepteur est immobile au bord d'une route, le passage des voitures et camions crée une fréquence Doppler élevée. Le lecteur désirant de plus amples détails peut se référer à [32].

Le caractère rapide ou lent de l'évanouissement (fast fading et slow fading, en anglais) du canal sans fil est déterminé par rapport au temps de cohérence, d'où l'importance de ce

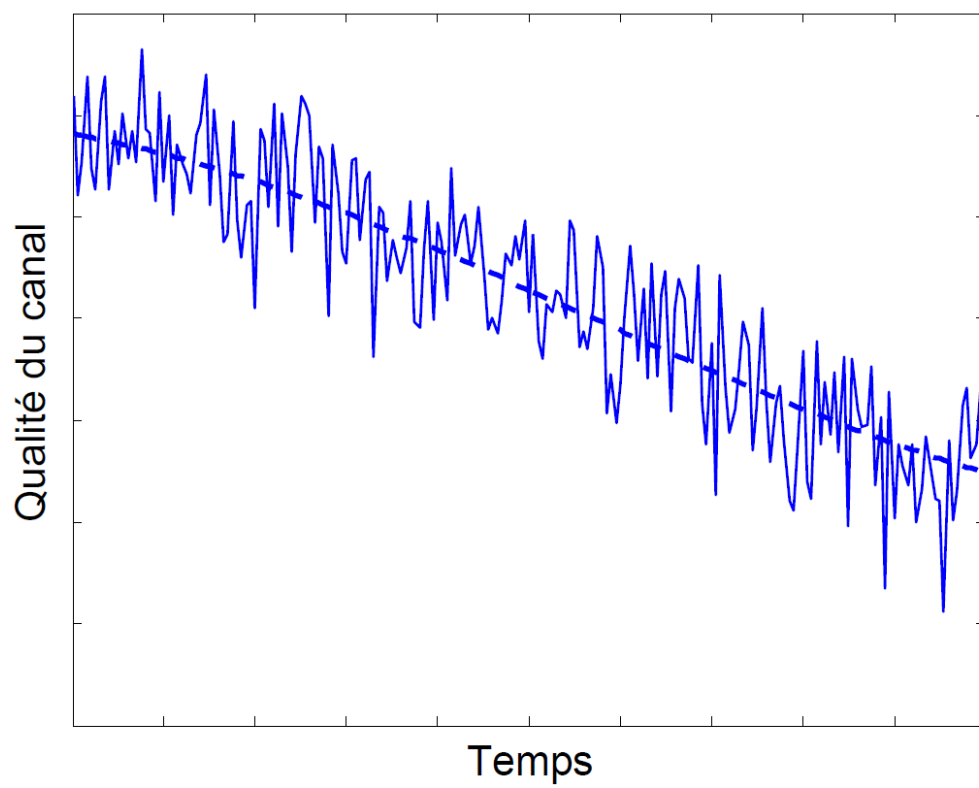


Figure 2.1 Évanouissement à petite et à grande échelle.

paramètre pour la caractérisation du canal [63]. En effet, le canal est considéré à évanouissement rapide si le temps de cohérence est très petit par rapport aux tolérances de délai de transmission de l'application. Dans le cas inverse, il est considéré à évanouissement lent.

2.2.2 Canal de Rayleigh

Lors de la conception de systèmes de communication, l'effet du canal doit être impérativement évalué afin de pouvoir estimer le comportement et les performances du système. Le modèle de canal le plus simple est le canal AWGN (Additive White Gaussian Noise). Dans ce canal, le signal reçu est dégradé par un bruit thermique. Ce modèle est surtout utilisé dans les transmissions filaires ou bien dans les communications dans l'espace. Par contre, il ne constitue pas une bonne référence pour les transmissions mobiles.

Le modèle de Rayleigh est largement utilisé pour les transmissions multitrajets, sans chemin dominant. Ce modèle représente le scénario le plus pessimiste où nous avons un nombre très important de réflecteurs et aucun chemin dominant. Des mesures expérimentales effectuées à Manhattan ont révélé que le canal mesuré est très similaire à un canal de Rayleigh[19].

Enveloppe du signal reçu

En se basant sur le modèle de Clarke [20, 37] pour les communications radiomobile, le champ électrique au récepteur peut être exprimé sous la forme d'une composante en phase $I(t)$ et une composante en quadrature $Q(t)$. Ces composantes sont fonction de l'amplitude et de la phase du signal reçu. Si le nombre de réflecteurs est élevé, nous pouvons affirmer selon le théorème de la limite centrale que les deux composantes en phase et en quadrature ($I(t)$ et $Q(t)$) du signal reçu sont gaussiennes centrées et de variance σ^2 . Par conséquent, nous pouvons montrer que l'enveloppe complexe du signal reçu $r = \sqrt{I(t)^2 + Q(t)^2}$ suit une distribution de Rayleigh [52], i.e. avec une fonction de densité de probabilité :

$$p(r) = \begin{cases} (r/\sigma^2) \exp(-r^2/2\sigma^2) & \text{si } r \geq 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Rapport signal à bruit

Sachant que l'enveloppe suit une distribution de Rayleigh, nous pouvons déduire que la puissance $P = r^2/2$ suit une distribution exponentielle [53]. Ainsi, nous pouvons calculer le rapport signal à bruit (SNR) défini comme le rapport entre la puissance reçue P et le bruit du canal N_0 . En effectuant un changement de variable et en posant $SNR = \gamma = P/N_0$, nous pouvons déduire que le SNR suit une distribution exponentielle de paramètre γ_0 , où $\gamma_0 = \sigma^2/N_0$ est le SNR moyen [53] :

$$p(\gamma) = \begin{cases} (1/\gamma_0) \exp(-\gamma/\gamma_0) & \text{si } \gamma \geq 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Densité spectrale de puissance

Dans les canaux à évanouissement, le signal reçu subit un étalement spectral dans la bande $[f_c \pm f_d]$, f_c étant la fréquence porteuse et f_d la fréquence Doppler. La densité spectrale de puissance, notée $S(f)$, décrit cet étalement. En considérant une antenne de réception verticale et omnidirectionnelle, nous pouvons montrer que la densité spectrale de puissance pour un canal Rayleigh [63] peut s'écrire :

$$S(f) = \begin{cases} 1/(\pi f_d \sqrt{1 - (f/f_d)^2}) & \text{si } |f| \leq f_d \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Le lecteur souhaitant avoir plus de détails concernant le canal Rayleigh peut se référer à [20, 38, 53].

Après avoir fait un survol de la description du canal à évanouissements de Rayleigh, nous allons dans la section suivante, présenter une modélisation de ce canal.

2.3 Modélisation du canal sans fil

Le canal Rayleigh peut être modélisé avec un filtre linéaire à réponse impulsionnelle finie, connu aussi sous le nom de modèle des TAP [39] :

$$y(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} X(t - nT)h_n(t) \quad (2.1)$$

où $h_n(t)$ est l'ensemble des taps du canal, et T le taux d'échantillonnage. Les taps $h_n(t)$ sont les coefficients du filtre traduisant les différents délais et atténuations subies par le signal transmis, et dont la distribution de l'enveloppe suit la loi de Rayleigh. Dans le cadre de nos simulations, nous allons considérer un canal Rayleigh plat dont la réponse en fréquence ne change pas significativement dans la bande du signal. Par conséquent, nous pouvons utiliser un modèle à un seul tap [32] et (2.1) peut être simplifiée comme suit :

$$y(t) = X(t)h(t) \quad (2.2)$$

En considérant un canal Rayleigh plat avec du bruit blanc gaussien additif (AWGN), l'expression (2.2) devient :

$$Y(t) = X(t)h(t) + w(t) \quad (2.3)$$

où $w(t)$ est le bruit AWGN. Le rapport signal à bruit (SNR) instantané au récepteur est alors exprimé comme suit :

$$\gamma(t) = \frac{P_{tr}}{\sigma_w^2} |h(t)|^2 \quad (2.4)$$

où P_{tr} est la puissance de transmission moyenne, et σ_w^2 la variance du bruit gaussien. La figure 2.2 présente l'évolution de $\gamma(t)$ pendant une seconde, en considérant un rapport P_{tr}/σ_w^2 de 10 dB et une fréquence Doppler maximale de 25 Hz dans 2.2(a) et 50 Hz dans 2.2(b).

Génération du canal Rayleigh

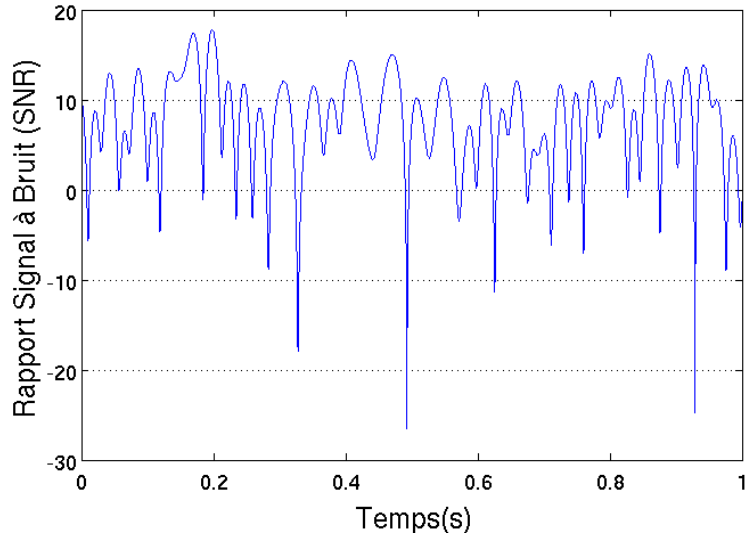
Pour générer les fluctuations d'amplitude d'un canal Rayleigh, deux approches sont principalement utilisées :

- Somme de sinusoides : SoS (Sum of Sinusoids) ;
- Bruit blanc filtré : FGN (Filtered Gaussian Noise).

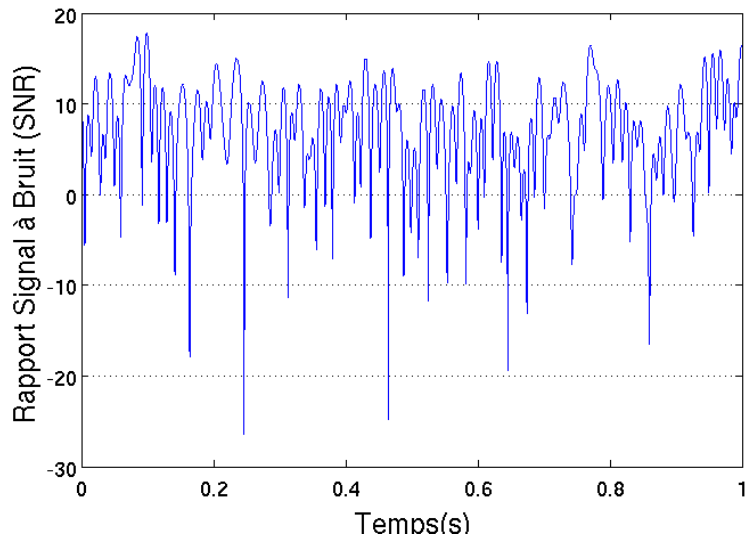
Plusieurs méthodes basées sur la somme de sinusoides ont été proposées pour générer un canal à évanouissement, et dont la plus célèbre est celle de Jakes [38]. L'idée derrière cette méthode est de créer un processus à évanouissement en superposant plusieurs ondes caractérisées par leur amplitude, leur angle d'arrivée et leur phase. En se basant sur le théorème de la limite centrale, le processus généré tend vers une distribution gaussienne. Par ailleurs, nous pouvons distinguer deux classes de SoS ; les modèles déterministes, qui ne contiennent aucun élément aléatoire une fois tous les paramètres fixés, e.g. le modèle de Jakes [38], et les modèles stochastiques, dont au moins un paramètre représente une variable aléatoire.

Dans la méthode du bruit blanc filtré (FGN), un processus gaussien avec les propriétés spectrales souhaitées peut être directement simulé en générant un processus gaussien et en le filtrant avec un filtre Doppler. Ce filtre doit être conçu de telle manière qu'il produit l'étalement spectral du canal. Des filtres à réponse impulsionnelle finie (FIR) et infinie (IIR) peuvent être utilisés à cette fin. Un FIR n'est pas sujet au problème de stabilité, mais requiert un grand nombre de coefficients pour approcher l'étalement spectral désiré. D'un autre côté, un IIR nécessite moins de coefficients mais peut entraîner un comportement instable.

Dans le cadre de nos simulations, le canal Rayleigh a été généré en utilisant la méthode du bruit blanc filtré (FGN). Le lecteur souhaitant avoir plus de détails sur la génération de canal de Rayleigh peut se référer à [39] et [37].



(a) Fréquence Doppler maximale de 25 Hz.



(b) Fréquence Doppler maximale de 50 Hz.

Figure 2.2 Exemples de la variation du SNR dans un canal Rayleigh, avec un rapport P_{tr}/σ_w^2 de 10 dB et une fréquence Doppler maximale de 25 Hz dans 2.2(a) et 50 Hz dans 2.2(b).

2.4 Techniques d'adaptation de lien

Comme nous l'avons vu dans la section 2.2, l'état du canal sans fil est variable et a tendance à changer rapidement. Par conséquent, des paramètres de transmission fixes ne sont pas toujours optimisés pour l'état courant du canal, et ne permettent pas d'en exploiter tout le potentiel.

En effet, l'inconvénient majeur des techniques de transmission non adaptatives, utilisant des paramètres de transmission fixes, est que le taux d'erreur binaire (BER, Bit Error Rate) change en fonction de l'état du canal. Or la majorité des applications nécessitent un BER maximal, qu'il ne faut pas dépasser, pour garantir un bon fonctionnement. L'adaptation de lien permet d'adapter les paramètres de transmission de telle façon que la contrainte sur le BER soit toujours respectée, au moins en théorie.

Le deuxième inconvénient concerne l'efficacité spectrale des schémas non adaptatifs. En effet, l'efficacité spectrale est constante quel que soit l'état du canal. Cela peut se traduire par une sous-exploitation de la capacité du canal si la modulation la plus robuste est employée pour s'assurer que le BER maximal soit toujours respecté. Pour les techniques d'adaptation de lien, l'efficacité spectrale est variable, ce qui permet d'exploiter au maximum la capacité du canal sans fil en adaptant les paramètres de transmission en fonction de l'état du canal.

Ainsi, les techniques d'adaptation de lien améliorent l'efficacité spectrale tout en respectant le BER maximal [31, 56]. Cependant, l'inconvénient majeur des techniques adaptatives est la nécessité d'un échange d'information entre l'émetteur et le récepteur. En effet, l'émetteur doit connaître l'état du canal en temps réel pour adapter le mode de transmission. Cette information lui est transmise par le récepteur qui mesure l'état du canal. De l'autre côté, le récepteur doit connaître les paramètres de transmission qui ont été utilisés par l'émetteur. Cet échange d'information induit une charge supplémentaire par rapport aux systèmes non adaptatifs.

Les techniques d'adaptation de lien ont été largement étudiées depuis la fin des années soixante. Plusieurs recherches ont proposé des techniques de transmission basées principalement sur :

- l'adaptation de la puissance de transmission [34, 8, 31, 48] ;
- l'adaptation de la modulation [66, 67, 10, 35, 70] ;
- l'adaptation du codage [65, 18, 45, 44, 43] ;
- l'adaptation de la diversité spatiale [16, 58, 46, 28, 11].

En se basant sur des mesures en temps réel du canal, ces techniques font varier un ou plusieurs de ces paramètres. En fait, toutes ces méthodes essayent de tirer profit des bonnes conditions du canal sans fil, en utilisant des combinaisons plus efficaces et permettant un

meilleur débit de transmission, tout en respectant les contraintes des taux d'erreur binaire (BER, Bit Error Rate).

2.4.1 Adaptation de la Modulation et du Codage (AMC)

L'AMC est une technique de transmission où la modulation et le codage sont conjointement variés par l'émetteur afin de parer aux conséquences des évanouissements du signal causés par le canal. L'AMC a été largement étudiée, surtout vers la fin des années quatre-vingt-dix, et son efficacité a été démontrée dans de nombreux travaux de recherche, entre autres [31, 10, 11]. Dans [9], les auteurs démontrent que l'utilisation d'une modulation adaptative combinée à un codage adaptatif est plus efficace dans le cas d'un canal Rayleigh que l'utilisation d'un codage fixe.

En effet, il a été prouvé que l'AMC maximise l'efficacité spectrale du lien sans fil tout en respectant le taux d'erreur maximal supporté par le système. Plus récemment, la recherche en AMC a été orientée vers les systèmes utilisant la technique OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [42, 41, 62, 69, 68]. De plus, des schémas AMC ont été proposés utilisant des méthodes cognitives pour la prise de décision [61, 64, 57].

Ainsi, cette technique est largement utilisée dans les standards de communication sans fil. Par exemple, les standards GSM et UMTS utilisent l'AMC dans leurs extensions EDGE [55] et HSDPA [40], respectivement. Plus récemment, le WiMAX [4] et le LTE [7] utilisent aussi l'AMC. Dans les réseaux locaux sans fil, l'AMC est aussi utilisé dans les standards 802.11g [2] et 802.11n [3].

Un système utilisant l'AMC dispose typiquement d'un ensemble de modulation de différents types (PSK, QAM, FSK), et de différentes tailles de constellation (2, 4, 16, etc.), ainsi que d'un ensemble de codage canal de différents types et taux de codage. La combinaison d'une modulation avec un codage nous donne le schéma de modulation et codage (Modulation and Coding Scheme, MCS). Par conséquent, l'AMC dispose d'un ensemble de MCS avec des propriétés différentes de point de vue de l'efficacité spectrale et de la robustesse.

La figure 2.3 présente le schéma fonctionnel d'un système de transmission utilisant l'AMC. L'émetteur exploite l'information retournée par le récepteur pour choisir le MCS le plus adapté, *i.e.* qui fournit la meilleure efficacité spectrale tout en générant un BER inférieur au BER maximal supporté par le système. Si le MCS est changé, le récepteur est avisé du changement, afin de pouvoir démoduler et décoder correctement les données reçues. Selon le système, le changement de MCS peut être transmis via des messages de gestion, ou encore en utilisant le préambule de la trame courante comme dans le cas du WiMAX [4].

La qualité de l'information retournée par le récepteur est très importante pour la performance de l'AMC. Une information imprécise sur la qualité du canal peut entraîner un

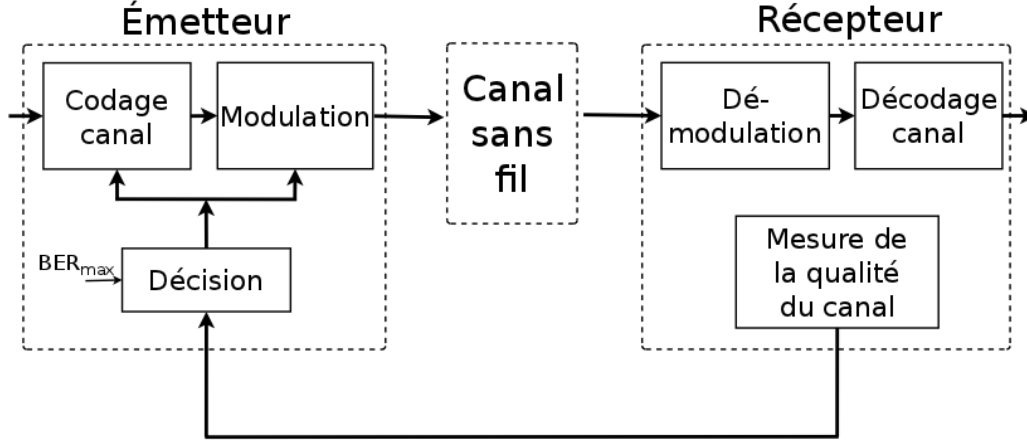


Figure 2.3 Schéma fonctionnel d'un système AMC.

mauvais choix du MCS, ce qui implique soit une sous-exploitation de la capacité réelle, soit une surestimation de la qualité du canal engendrant des erreurs de transmission. Par ailleurs, le choix du type de la mesure est aussi très important. Plusieurs chercheurs se sont penchés sur cette question afin de déterminer le meilleur type de mesure. Dans [54], les auteurs soutiennent que le BER mesuré au récepteur est la meilleure mesure du canal pour le changement de MCS. Toutefois, estimer le BER d'une façon fiable est très difficile sur une courte période. Augmenter la période de mesure, pour avoir une meilleure estimation du BER, diminue l'efficacité de l'adaptation, car cela diminue la fréquence de mesures. Ainsi dans la plupart des systèmes utilisant l'AMC, c'est le SNR instantané, mesuré au récepteur, qui est retourné à l'émetteur pour indiquer l'état du canal. En effet, le SNR est beaucoup plus facile à estimer que le BER, et surtout il ne pose aucune contrainte sur la fréquence de mesure. La mesure du SNR peut être effectuée en se basant sur des signaux pilotes, transmis de façon régulière par l'émetteur.

En se basant sur le SNR, l'émetteur peut choisir le MCS le plus approprié. Le tableau 2.1

Tableau 2.1 Schémas de modulation et codage (MCS)

MCS	Modulation	Taux de codage	Efficacité (bits/symbole)	Seuils (dB)
1	BPSK	1/2	$1/2 = 0.5$	8.56
2	BPSK	2/3	$2/3 \approx 0.66$	10.73
3	16-QAM	1/2	2	12.29
4	16-QAM	2/3	$8/3 \approx 2.66$	14.78
5	64-QAM	1/2	3	16.53
6	64-QAM	2/3	4	19.22
7	256-QAM	2/3	$16/3 \approx 5.33$	21.15

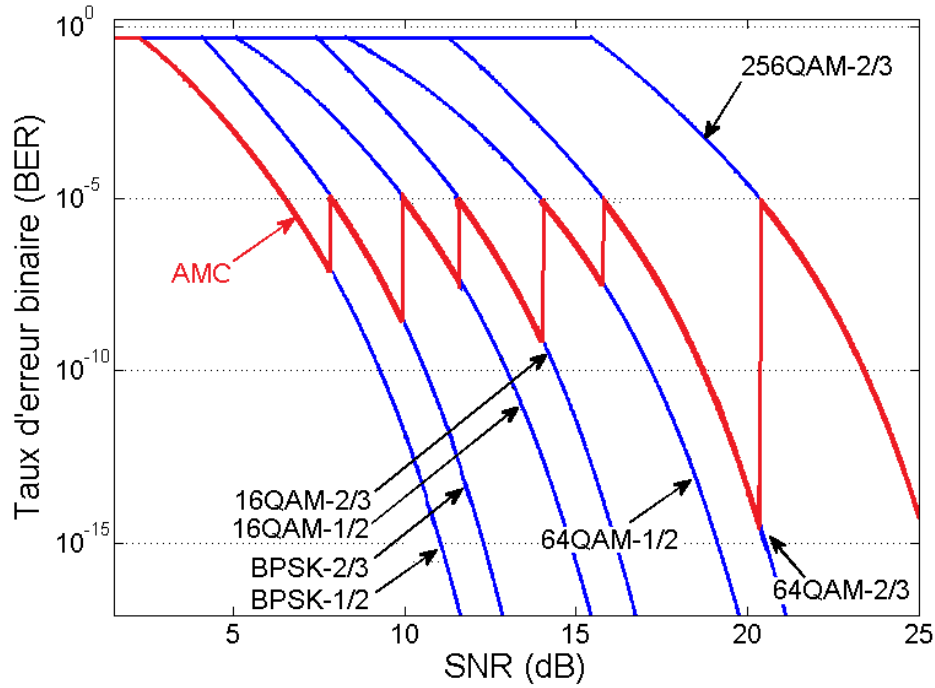


Figure 2.4 BER en fonction du SNR pour différents schémas de modulation et codage.

présente un exemple de sept schémas de modulation et de codage en considérant deux taux de codages convolutionnels (1/2 et 2/3) et quatre types de modulations (BPSK, 16QAM, 64QAM et 256QAM). Ces modes de transmission offrent une efficacité spectrale allant de 0.5 à 5.33 bits/symbole. Bien évidemment, tous les MCS n'offrent pas la même robustesse contre les erreurs de transmission. La figure 2.4 illustre le BER en fonction du SNR instantané pour les 7 MCS considérés dans le tableau 2.1 pour un canal AWGN. Considérant un certain BER maximal, nous devons changer de MCS de telle manière que le BER ne le dépasse pas, tout en maximisant l'efficacité spectrale. Connaissant la relation reliant le BER au SNR, analytiquement ou par simulation, nous pouvons déduire des seuils de changement de MCS, délimitant les régions d'utilisation idéale de chaque MCS. Cette technique est connue sous le nom de méthode des seuils ou encore de méthode de partitionnement du SNR. La manière de choisir et d'utiliser les seuils de changement de MCS a été traitée dans plusieurs travaux de recherche [17, 47, 60] afin d'améliorer la performance de l'AMC.

Le tableau 2.1 présente les seuils de changement calculés pour un BER maximal de 10^{-5} . Par exemple, pour tout SNR supérieur ou égal à 7.89, le MCS 1 (BPSK-1/2) permet d'assurer un $\text{BER} < 10^{-5}$. Les seuils nous permettent de déduire le meilleur MCS en fonction du SNR. Le tableau 2.2 présente le partitionnement du SNR en fonction du meilleur MCS à utiliser. Il est à noter que pour un SNR inférieur à 7.89 dB, le MCS 1 ne permettrait pas de satisfaire

la contrainte sur le BER. Dans ce cas de figure, soit il faut continuer à utiliser le MCS-1 car c'est le schéma le plus robuste, ou bien ne pas transmettre et attendre que le SNR s'améliore.

Par ailleurs, nous allons voir qu'avec la mobilité, le SNR varie énormément dans le temps, ce qui peut générer des problèmes pour l'AMC. En effet, si le SNR diminue durant l'intervalle de transmission, le MCS choisi peut ne plus garantir le BER cible.

Tableau 2.2 Partitionnement du SNR en fonction des MCS pour un BER_{max} de 10^{-5}

MCS	Partitionnement
1. BPSK-1/2	$7.89 \leq SNR < 10$
2. BPSK-2/3	$10 \leq SNR < 11.59$
3. 16-QAM-1/2	$11.59 \leq SNR < 13.99$
4. 16-QAM-2/3	$13.99 \leq SNR < 15.80$
5. 64-QAM-1/2	$15.80 \leq SNR < 18.35$
6. 64-QAM-2/3	$18.35 \leq SNR < 20.38$
7. 256-QAM-2/3	$20.38 \leq SNR$

Le lecteur désirant avoir de plus amples informations concernant l'AMC peut se référer à [32].

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le canal sans fil à évanouissement et sa modélisation. Par la suite, nous avons introduit les techniques d'adaptation de lien, et l'adaptation de modulation et codage (AMC).

Comme nous l'avons mentionné, l'AMC est une technique permettant une augmentation très notable du débit de la transmission en améliorant notamment l'efficacité spectrale sans pour autant sacrifier le BER. Néanmoins, les performances de l'AMC sont très conditionnées par la qualité des mesures du canal, qui influence le choix du MCS.

Nous allons présenter dans le chapitre suivant un nouveau mécanisme, basé sur deux évolutions de l'AMC, qui nous permet d'avoir une fiabilité différenciée sur un seul lien sans fil.

CHAPITRE 3

DIFFÉRENCIATION DU NIVEAU DE FIABILITÉ DANS UN CANAL SANS FIL

Le présent chapitre décrit le mécanisme de protection différenciée DiffAMC. Nous allons étudier dans la section 3.2 la première sous-couche de DiffAMC qui utilise la différenciation par classes. Par la suite, nous allons détailler dans la section 3.3 la deuxième sous-couche de DiffAMC, utilisant la méthode de AMC intelligent. Finalement, la section 3.4 expose la technique DiffAMC.

3.1 Introduction

L'expansion de l'Internet a conduit à une augmentation exponentielle du trafic véhiculé sur la toile et à un changement des habitudes d'utilisation. Cette tendance s'est confirmée avec l'augmentation incessante de la bande passante offerte aux abonnées d'un côté, et un contenu de plus en plus riche, complexe et diversifié, d'un autre côté. En parallèle, nous assistons à une demande croissante des mêmes types de services avec la mobilité en plus. Les technologies de quatrième génération (WiMAX[4] et LTE[7]) affichent clairement la nouvelle tendance en tablant sur un réseau sans fil tout IP, et en mettant en avant leur capacité de transmission de données. Au final, les problèmes classiques de l'Internet se trouvent amplifiés par les contraintes et les difficultés que présente la gestion de la mobilité et le maintien de la qualité de service (QoS) d'une connexion dans un réseau sans fil.

Par ailleurs, cette grande diversité d'applications (voix, vidéo, web, etc) nécessite une gestion différente. Ainsi, les nouveaux standards prévoient plusieurs classes de services prévues à cet effet. Chaque classe doit satisfaire les contraintes de qualité de service (QoS, Quality of service) relative à chaque type application, à savoir :

- débit maximum ;
- débit minimum alloué ;
- délai maximum ;
- gigue maximale ;
- latence maximale ;
- type d'ordonnancement ;
- priorité ;
- etc.

D'un autre côté, les besoins en terme de qualité de fiabilité (QoR, Quality of Reliability) diffèrent non seulement d'une application à l'autre, mais au sein de la même classe. Par exemple, tous les utilisateurs du service de la voix (téléphonie) n'ont pas nécessairement besoin du même niveau de fiabilité. Les utilisateurs exerçant des métiers sensibles ont plus besoin d'un service hautement fiable qu'un utilisateur moyen.

Bien que la différenciation de la qualité de service a été prévue par les nouveaux standards, WiMAX et LTE, la fiabilité dans la couche physique demeure une constante. Les standards proposent généralement un niveau de fiabilité de la transmission qui satisfait la plupart des flux.

Dans ce projet de maîtrise, nous considérons que la fiabilité est relative au taux d'erreurs binaire (BER). Plus la valeur du BER est faible et plus le système de transmission est considéré comme étant fiable. Il est aussi à noter qu'étant donné que le BER et le taux de perte de paquets (PER) sont proportionnels, diminuer le BER revient à diminuer le PER.

Dans ce chapitre, nous allons proposer un nouveau mécanisme de différenciation de niveau de la fiabilité pour un système sans fil utilisant l'AMC. Le mécanisme proposé (DiffAMC) permet d'avoir plusieurs niveaux de fiabilité sur un seul lien sans fil. DiffAMC est compatible avec WiMAX et LTE et peut être utilisé indépendamment de la configuration de la couche physique. Il peut être utilisé avec une transmission à porteuse unique (SC, Single Carrier) ou OFDM, et avec ou sans diversité spatiale. DiffAMC peut être vu comme une couche MAC additionnelle. L'ajout de la couche DiffAMC permet d'affecter à chaque connexion un certain niveau de fiabilité selon ses besoins. La couche DiffAMC est composée de deux sous-couches (figure 3.1) ; la sous-couche de différenciation par classe AMC et la sous-couche de différenciation par AMC intelligent. Nous allons présenter dans ce qui suit ces deux sous-couches, puis la couche DiffAMC dans la dernière section.

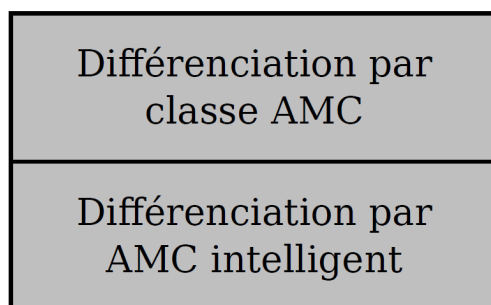


Figure 3.1 Couche DiffAMC.

3.2 Différenciation par classe AMC

Comme nous l'avons vu dans le Chapitre 2, l'AMC est une technique de transmission qui consiste à faire varier le type de modulation et du codage afin de maximiser le débit de transmission (noté D), sous contrainte d'un taux d'erreur binaire maximal (noté BER_{max})(3.1) :

$$\begin{array}{ll} \text{Maximiser} & D \\ \text{S.C.} & BER \leq BER_{max} \end{array} \quad (3.1)$$

Le BER_{max} est souvent fixé par le standard ou laissé à la discrétion du constructeur ; par exemple, le BER_{max} proposé dans le standard WiMAX est 10^{-6} [4]. En pratique, l'AMC se traduit par la définition d'un ensemble de seuils de changement de schéma de modulation et codage (MCS). Ces seuils délimitent les zones d'utilisation de chaque MCS en fonction de l'état du canal. Dans ce qui suit, l'état du canal sera décrit par le SNR.

3.2.1 Problématique

Typiquement, le BER_{max} est choisi en fonction du taux de perte de paquets (PER, Packet Error Rate) qui garantit le bon fonctionnement des applications. Étant donné que toutes les applications n'ont pas les mêmes besoins en terme de PER, il faut considérer le taux minimum qui les satisfait toutes. Le BER_{max} est aussi fonction de la taille du maximale des paquets (noté L) qu'il faut prendre en compte. Les équations 3.2 et 3.3 illustrent le lien entre le BER et le PER.

$$PER = (1 - (1 - BER)^L) \quad (3.2)$$

et inversement :

$$BER = 1 - \exp\left(\frac{\ln(1 - PER)}{L}\right) \quad (3.3)$$

Sur l'ensemble des flux (noté I), l'AMC utilise le BER_{max} du flux k ayant le couple (PER_{max_k}, L_k) générant le BER le moins élevé (équation 3.4) :

$$BER_{max} = \min_{i \in I} \left(1 - \exp\left(\frac{\ln(1 - PER_{max_i})}{L_i}\right) \right) \quad (3.4)$$

Cela implique une perte de ressource pour tous les autres flux qui ne nécessitent pas un BER aussi petit. En effet, plus le BER_{max} considéré est petit, et plus les seuils de changement de schémas de modulation et codage (MCS) sont élevés. Le système aura donc plus tendance à utiliser des MCSs de moindre efficacité spectrale, ce qui réduit inutilement l'efficacité de la transmission dans le cas des flux non exigeants (Voir sous section 3.2.3).

3.2.2 Conception

Le problème présenté dans la sous-section 3.2.1 peut être résolu par la différenciation par classe. L'idée principale consiste à utiliser plusieurs valeurs de BER_{max} au lieu d'une seule. De chaque valeur de BER_{max} , une classe AMC est générée, avec les seuils de changement correspondants. Dans le cadre de notre étude, nous proposons d'utiliser 7 classes AMC, avec un BER_{max} allant de 10^{-3} à 10^{-9} . Le tableau 3.1 illustre les valeurs de seuils de changement pour ces 7 classes. L'émetteur utilise ces seuils pour déterminer à partir de quelle valeur de SNR, il peut commencer à utiliser un MCS particulier. Nous remarquons que plus le BER_{max} est petit, et plus les seuils de changement sont élevés. Les seuils sont calculés en se basant sur les courbes de taux d'erreur binaire en fonction du SNR de chaque schéma de modulation et codage. Ces courbes peuvent être générées analytiquement ou avec des simulations. Dans le cadre de notre étude, les courbes de MCS sont générées par simulation à l'aide de l'outil *bertool* de Matlab.

La différenciation par classe AMC, nous permet d'avoir un AMC optimisé pour chaque type de flux. De plus cette technique nous permet de considérer des classes ayant un BER_{max} très petit sans pour autant compromettre l'efficacité générale. Cela permet de proposer des classes hautement fiables pour les flux qui en ont besoin, ou bien offrir une protection supplémentaire. Ces niveaux peuvent être assimilés à des canaux physiques virtuels, chacun garantissant un certain BER_{max} . Les flux de données provenant des couches supérieures, typiquement IP, peuvent être acheminés sur ces canaux en fonction du niveau de fiabilité assigné au flux.

3.2.3 Évaluation des performances

Afin d'évaluer la performance de la méthode de différenciation par classe AMC, nous avons simulé un système AMC avec un émetteur transmettant des paquets à intervalle régu-

Tableau 3.1 Seuils de changement par classe AMC

	Classe1	Classe2	Classe3	Classe 4	Classe5	Classe6	Classe7
	BER						
	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
BPSK-1/2	6.37	7.16	7.89	8.56	9.16	9.68	10.16
BPSK-2/3	8.29	9.19	10.00	10.73	11.39	11.97	12.50
16QAM-1/2	9.95	10.80	11.59	12.29	12.92	13.47	13.97
16QAM-2/3	12.07	13.09	13.99	14.78	15.50	16.13	16.69
64QAM-1/2	14.05	14.96	15.80	16.53	17.19	17.76	18.28
64QAM-2/3	16.21	17.36	18.35	19.22	19.99	20.65	21.25
256QAM-2/3	18.52	19.50	20.38	21.15	21.84	22.43	22.96

lier vers un récepteur. Le récepteur retourne le SNR mesuré, afin de permettre à l'émetteur de choisir le schéma de modulation et codage approprié. L'intervalle de mise à jour du SNR est appelé intervalle de transmission (TTI, Time Transmission Interval). Les MCSs utilisés sont présentés dans le tableau 3.1. Nous avons supposé dans nos simulations que les données échangées entre l'émetteur et le récepteur concernant le SNR mesuré et le MCS sont transmises de façon fiable. Ainsi, tous les résultats obtenus ne peuvent pas être affectés par une source d'erreurs autre que le canal sans fil. Le tableau 3.2 détaille les paramètres de la simulation.

Tableau 3.2 Paramètres de la simulation

Paramètres	Valeurs
Durée de la simulation	120 s
Type du canal sans fil	Rayleigh
Fréquence Doppler (F_d)	100 Hz
SNR moyen à l'émetteur	20 dB
Durée du TTI	2 ms
Temps d'inter-arrivée des paquets	0.2 ms
Nombre de classes AMC	7 [10^{-3} .. 10^{-9}]
Taille des paquets	1500 octets

Taux de perte de paquets

Nous avons réalisé un ensemble de simulations en changeant à chaque fois de classe AMC. Pour chaque classe, la simulation a été répétée 35 fois avec des réalisations différentes du canal sans fil afin de calculer les intervalles de confiance. Nous avons considéré un évanouissement par bloc, c'est à dire que le SNR est considéré constant durant le temps de transmission d'un paquet. Le SNR du premier symbole du paquet est considéré comme le SNR du paquet. Cette hypothèse est valable car le temps de transmission d'un paquet est très petit comparé au temps de cohérence du canal, et donc nous pouvons supposer que le canal est constant durant cette période, sans nullement affecter nos résultats. Cependant, le SNR varie entre les paquets en fonction de F_d .

Le taux de perte de paquets est mesuré au récepteur en le dérivant du BER mesuré au moment de la transmission du paquet. La figure 3.2 présente les résultats obtenus en fonction des 7 classes AMC proposées. Nous remarquons que le PER varie en fonction de la contrainte sur BER_{max} . La simulation montre que les classes AMC présentent un PER décroissant au fur et à mesure que le BER_{max} diminue. L'amélioration moyenne du PER entre deux classes successives est de 17%, avec une amélioration maximale entre les classes 1 et 2 de 23%, et minimale entre les classes 6 et 7 de 9.7%.

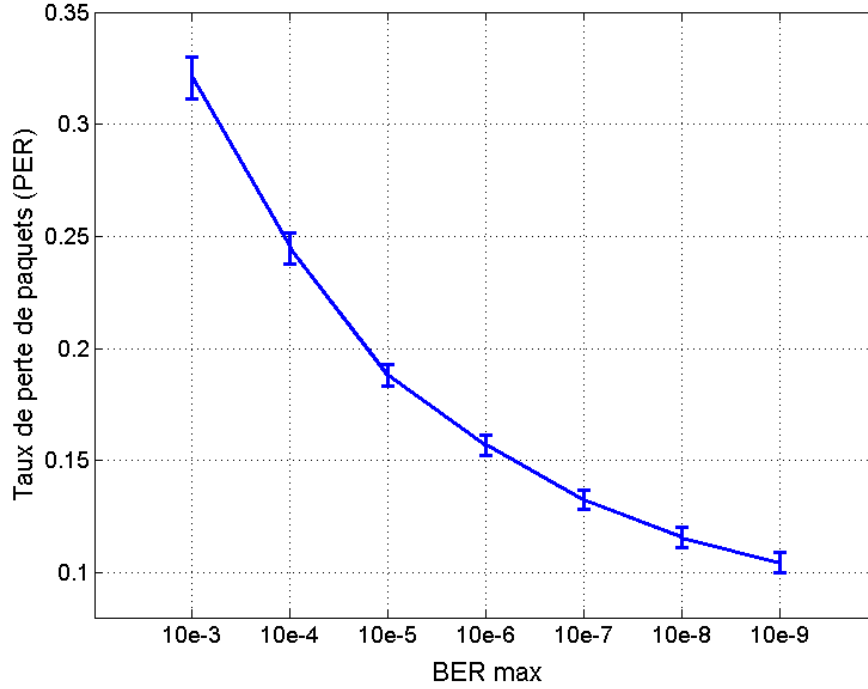


Figure 3.2 Taux de perte de paquets en fonction des classes AMC.

Débit symbole

Nous avons calculé le débit utile par symbole comme suit :

$$\text{Débit utile par symbole} = \left(D_B.T.(1 - PER) \right) / N_s$$

avec :

D_B Débit brut

T Taux de codage

N_s Nombre de symboles

Cette mesure nous permet d'évaluer l'impact des classes AMC sur le débit utile par symbole. Il est à noter que plus le schéma de modulation et codage utilisé est robuste, plus le nombre de symboles nécessaires à la transmission d'un paquet est grand, et *vice versa*. Le débit moyen de transmission est inversement proportionnel à la courbe de PER. En effet, les classes ayant le PER le moins élevé, ont naturellement le débit utile le plus élevé.

La figure 3.3 présente le débit utile par symbole en fonction des classes AMC. Le débit le plus élevé est réalisé par la classe 3 ($BER_{max} = 10^{-5}$) avec une moyenne de 3.17 bits/Symbole. Les classes supérieures et inférieures réalisent des débits moins élevés. Il est intéressant de souligner dans ce contexte que les causes de cette diminution diffèrent. Pour les classes 1 et

2 ($BER_{max} : 10^{-3}$ et 10^{-4}), le débit utile est affecté par le taux d'erreur de transmission très élevé. Par contre, pour les classes 4 à 7, la diminution du débit est essentiellement causée par l'utilisation de MCSs de moindre efficacité (et donc plus robustes) pour satisfaire la contrainte de BER_{max} . De plus, nous pouvons conclure qu'il est inutile d'utiliser les classes 1 et 2 puisqu'elles offrent un débit utile moindre que la classe 3 et un taux de perte de paquets plus élevé.

3.3 Différenciation par AMC intelligent

3.3.1 Problématique

Contrairement à un canal de transmission à bruit additif gaussien blanc AWGN (Additive White Gaussian Noise), un canal radio mobile est caractérisé par un rapport signal à bruit (SNR) qui varie dans le temps, en raison du phénomène de propagation multi-trajet (voir Chapitre 2). Par conséquent, un retour d'information fréquent et précis entre le récepteur et l'émetteur, sur la qualité de canal, est crucial pour l'AMC.

En règle générale, l'émetteur ajuste la modulation et le taux de codage en se basant sur l'information de l'état du canal (CSI, Channel State Information) précédemment envoyée par le récepteur. Quand l'intervalle de mise à jour du CSI n'est pas suffisamment petit par rapport au temps de cohérence du canal, la performance de l'AMC se trouve grandement affectée. C'est souvent le cas avec les canaux à évanouissement rapide, quand des contraintes du système (ou du standard) ne permettent pas d'avoir un intervalle de mise à jour assez petit. Autrement dit, le délai entre l'instant de mesure de la qualité du canal, et le début de la transmission de données est primordial pour le bon fonctionnement de l'AMC. Plus ce délai est grand, et plus le risque que le canal change est grand.

Ainsi, deux problèmes majeurs peuvent être identifiés :

1. Imprécision de la mesure de CSI, en raison du délai entre l'émetteur et le récepteur ou de l'estimation du canal.
2. Variation de l'état de canal entre deux mises à jour de CSI, pendant l'intervalle de transmission (TTI), qui est le plus petit intervalle de temps où les paramètres de transmission sont inchangés.

Plusieurs chercheurs se sont penchés sur ces problèmes, et il a été démontré que les techniques de prédiction sont extrêmement efficaces pour les résoudre [26, 22]. Deux sortes de prédiction sont utilisées dans ce contexte ; la prédiction à courte (short range prediction) et à longue portée (long range prediction). La portée de l'extrapolation étant l'intervalle normalisé entre la dernière valeur connue et la valeur extrapolée.

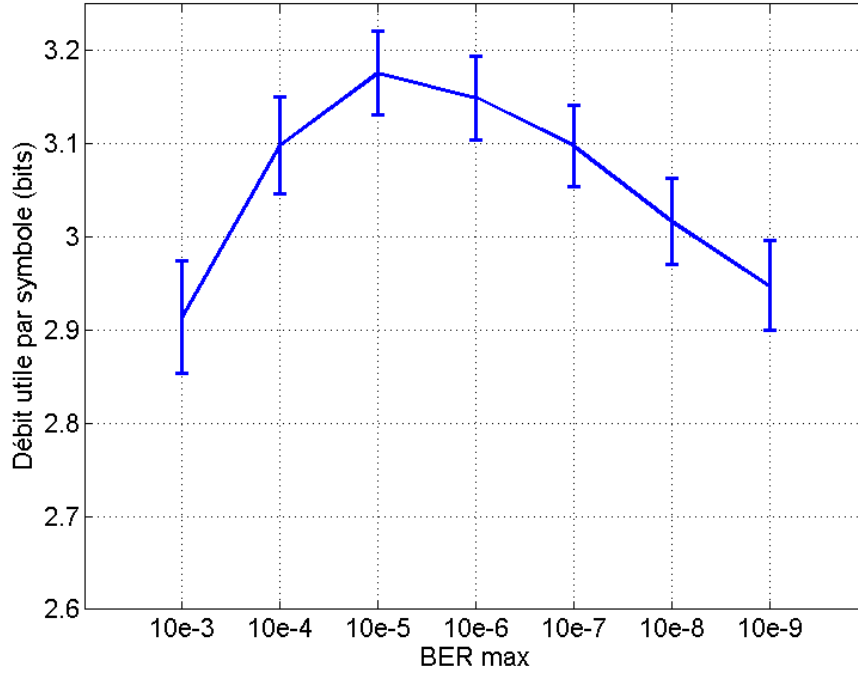


Figure 3.3 Débit utile par symbole en fonction des classes AMC.

Pour répondre au premier problème, la prédiction à courte portée est utilisée afin d'améliorer la précision des mesures. Dans [23, 24, 26], les auteurs ont montré que la prédiction optimale peut être approchée. Pour le deuxième problème, la prédiction à longue portée est utilisée. Cette dernière est plus difficile à réaliser que celle à courte portée [25].

Les techniques de prédictions à longue portée sont un outil puissant qui peut accroître la performance globale de l'AMC en termes de débit et de fiabilité de la transmission. Cependant, elles présentent quelques inconvénients qui peuvent nuire à leurs utilisation en pratique, à savoir :

- grande complexité ;
- besoins d'une grande mémoire ;
- information précise sur le type de canal sans fil ;
- fréquence de mesure élevée.

En effet, ces techniques nécessitent une grande quantité de mémoire à cause de l'utilisation de filtres d'ordre élevé. De plus, les techniques de prédiction requièrent généralement une connaissance très précise du modèle du canal et surtout de sa fonction d'auto-corrélation. Ces informations ne sont pas toujours disponibles en pratique et la fonction d'auto-corrélation ainsi que la fréquence Doppler varient en fonction du temps [51, 30]. Même si nous supposons

que la fonction d'auto-corrélation est connue, une fréquence de mesure élevée est nécessaire pour extraire ces paramètres. Si la fonction d'auto-corrélation est estimée, les paramètres du modèle devraient être recalculés fréquemment, ce qui augmentera encore plus la complexité. À titre d'exemple, dans [25], le débit optimal a été approché en utilisant un modèle de prédiction basé sur une estimation aux moindres carrés MMSE (Minimum Mean Square Error). La fréquence de mesure utilisée est dix fois supérieure à la fréquence Doppler maximale, et la mémoire a une capacité de 50 valeurs. Le SNR utilisé a une moyenne de 160 dB, ce qui est inutilisable en pratique. Un SNR inférieur peut diminuer la précision des mesures et introduire des erreurs de prédiction.

Cas du WiMAX et du LTE

Le problème de variation de CSI entre le moment de mesure et celui de transmission est aussi d'actualité dans le cas des nouveaux standards de communication. Ce sont les termes qui changent. Dans le cas du WiMAX, les connexions se font attribuer leurs schémas de modulation et codage (MCS) et les autres paramètres de transmission, au début de la trame. En fait, ces paramètres sont calculés à l'avance par l'ordonnanceur de la station de base (BS). Les paramètres du lien montant sont envoyés dans le message UL MAP (Uplink Media Access Protocol), et ceux du lien descendant dans le DL MAP (Downlink Media Access Protocol). Pour le LTE, c'est le canal PUCCH (Physical Uplink Control Channel) qui est responsable d'envoyer les paramètres de transmission dans le lien montant, et le PDCCH (Physical Downlink Control Channel) dans le lien descendant. La différence est que ces canaux sont dans la sous-trame LTE.

Par conséquent, dans les deux standards ce qui compte vraiment c'est la période de mise à jour de ces paramètres de transmission et non la période de mise à jour du CSI. Même si la fréquence de mise à jour du CSI est plus grande, la BS va calculer les paramètres en fonction du CSI le plus récent, à chaque ordonnancement. Ainsi, la période de mise à jour des paramètres de transmission coïncide avec l'intervalle d'ordonnancement. Pour le WiMAX mobile (802.16e), l'ordonnancement se fait par trame et donc l'intervalle d'ordonnancement est de 5 ms. Dans le cas du LTE, la durée de la trame est de 10 ms, mais l'ordonnancement se fait par sous-trame, et donc la durée de l'intervalle d'ordonnancement est de 1 ms. Donc le LTE peut avoir une fréquence de mise à jour 5 fois plus élevée que le WiMAX quelle que soit la fréquence de mise à jour de CSI de ce dernier. Ainsi quelque soit la fréquence de mise à jour de CSI, il est toujours vrai que :

- LTE : $TTI \geq 1 \text{ ms}$;
- WiMAX : $TTI \geq 5 \text{ ms}$.

AMC intelligent

L'impact de la variation du CSI entre deux mises à jour sur la fiabilité de la transmission peut être réduit en utilisant la technique de AMC intelligent [14]. Contrairement aux méthodes de prédiction, cette technique améliore les performances de l'AMC tout en ayant un niveau de complexité très bas. De plus, cette méthode ne nécessite aucune information concernant le canal sans fil. Nous avons utilisé les paramètres réglables de cette méthode afin d'offrir une différenciation de niveau de fiabilité.

3.3.2 Conception

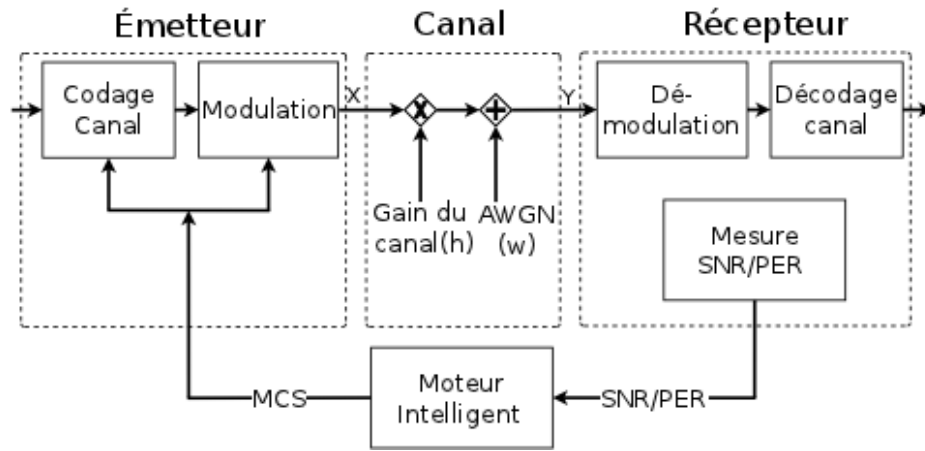
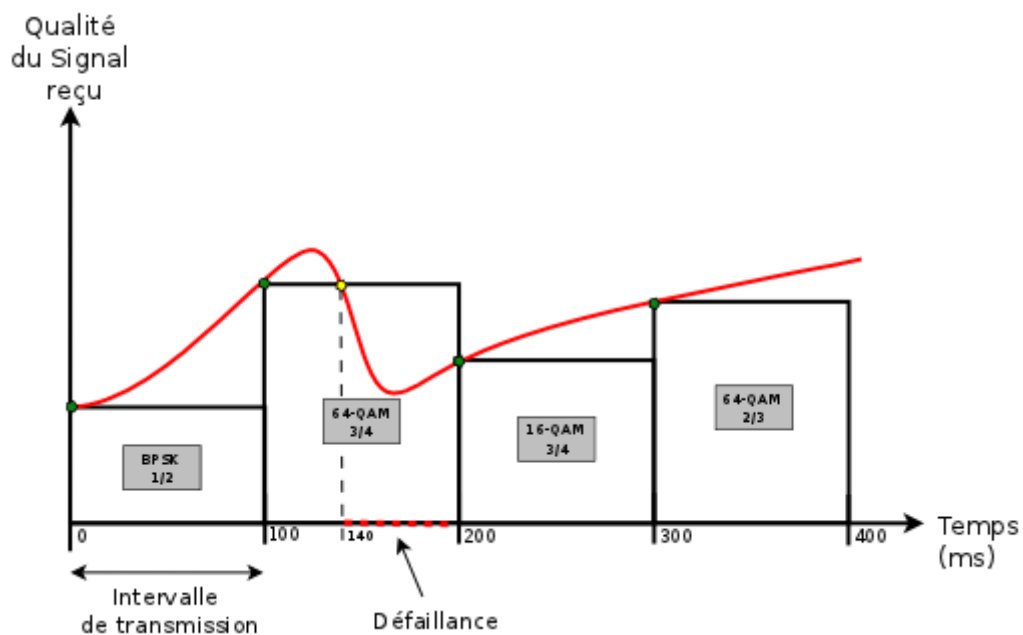


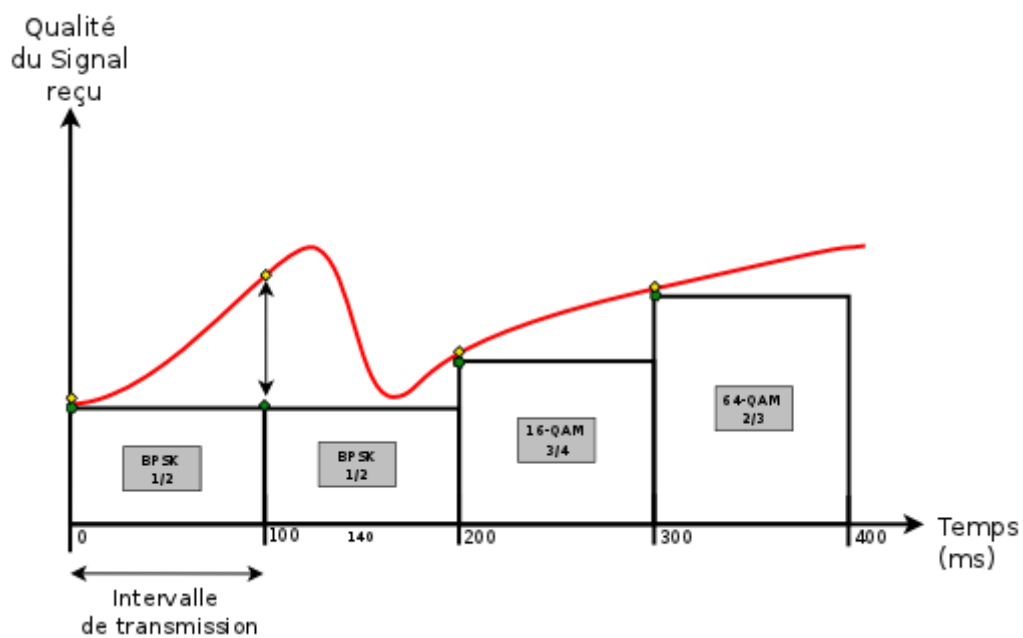
Figure 3.4 Schéma fonctionnel d'un système de transmission utilisant l'AMC intelligent (source [14])

L'idée fondamentale de l'AMC intelligent consiste à agir sur l'information retournée par le récepteur pour résoudre le problème de variation entre 2 mesures. L'organe de prise de décision de l'AMC intelligent est le moteur intelligent (IE, Intelligent Engine). En se basant sur l'information de l'état du canal retournée par le récepteur, le IE a pour rôle de fournir le schéma de modulation et codage (MCS) à utiliser dans le prochain intervalle de transmission (TTI). La figure 3.4 présente le schéma fonctionnel d'un système de transmission utilisant l'AMC intelligent. Il est à noter que le IE peut être placé au récepteur ou à l'émetteur. Le IE ajuste le MCS de façon à diminuer l'impact de la variation du canal entre deux mesures.

La figure 3.5(a) montre le problème de variation dans le cas de l'AMC classique. La dégradation de la qualité du canal dans l'intervalle [140, 200] ms rend le MCS utilisé inapproprié pour l'état du canal. Cela engendre une défaillance du fonctionnement de l'AMC car la contrainte sur le BER_{max} n'est plus respectée. La figure 3.5(b) présente le comportement



(a) AMC Classique.



(b) AMC intelligent.

Figure 3.5 Comportement de l'AMC classique et AMC intelligent envers le problème de variation de CSI.

- Offset : Valeur en dB qui sert à diminuer la lecture du SNR mesuré.

Le SNR prédit, noté γ_{pred} , est calculé en se basant sur un modèle d'extrapolation et en considérant une portée d'extrapolation. La valeur de γ_{pred} représente une estimation de l'évolution probable du SNR durant le prochain TTI. La valeur minimale entre le SNR prédit et le (SNR mesuré - *offset*) est retenue. Le paramètre *offset* sert à diminuer le SNR mesuré afin de prévenir le cas où il est très proche du seuil inférieur de changement de MCS. En se basant sur le SNR mesuré, la fonction de seuils détermine le MCS correspondant (Voir section 2.4).

Algorithm 1 Fonctionnement de l'Engin d'Extrapolation (EE)(source [14])

Require: *modele_extrapolation* {paramètre 1}
Require: *taille_memoire* {paramètre 2}
Require: *portee_extrapolation* {paramètre 3}
Require: *Offset* {paramètre 4}
Require: $\gamma(t_0)$ {SNR mesuré}
Require: $\gamma(t_{-1}), \dots, \gamma(t_{-m})$ {ensemble des SNR mesurés précédemment}
 {Cette boucle est exécutée pour chaque TTI}
loop
 $\gamma_{pred} \leftarrow f_{model}(modele_extrapolation, [\gamma(t_0)..\gamma(t_{-m})])$
 if $\gamma_{pred} < (\gamma(t_0) - Offset)$ **then**
 $OUTPUT \leftarrow \gamma_{pred}$
 else
 $OUTPUT \leftarrow \gamma(t_0) - Offset$
 end if
end loop

Engin Stochastique

Les entrées de l'engin stochastique (SE) sont le MCS prédit, noté s_{pred} , et le PER mesuré, noté \hat{p} . À partir de ces données, le SE fournit le MCS à utiliser par l'émetteur dans le prochain TTI. Le SE a deux paramètres :

- Seuil de défaillance : Seuil maximum de PER, à partir duquel le SE considère que l'engin d'extrapolation a pris une mauvaise décision ;
- Nombre maximal d'erreurs : le nombre de mauvaises décisions qui peuvent être prises par l'engin d'extrapolation (EE), avant que le SE entre en action.

Le fonctionnement de l'engin stochastique (SE) est présenté dans l'Algorithme 2. Nous avons défini la fonction L , qui retourne le niveau du MCS utilisé $\{0, 1, \dots, n-1\}$ (e.g $L(s_i(t)) = i$). La réciproque, notée L^{-1} , effectue l'opération contraire (e.g $L^{-1}(i) = s_i(t)$). Les hauts

niveaux correspondent aux MCSs ayant une grande efficacité spectrale et basse robustesse, et *vice versa*.

La décision prise par l'engin stochastique (SE) est basée sur le schéma de modulation et codage (MCS) actuel et passé, et sur le PER mesuré. Il a pour rôle de contrôler la qualité des décisions prises par l'engin d'extrapolation (EE) et de les modifier si nécessaire. En effet, si le SE détecte que le PER est supérieur au seuil de défaillance fixé, et que le EE continue d'utiliser le même MCS ou propose un MCS moins robuste, il réagit en diminuant le niveau du MCS vers un niveau qui est plus robuste. Cette situation se produit lorsque la fréquence de mise à jour de SNR est faible comparée à la fréquence Doppler. Dans ce cas, le EE aura de la difficulté à bien fonctionner.

Algorithm 2 Fonctionnement de l'Engin Stochastique (SE)(source [14])

```

Require: seuil_defaillance {paramètre 1}
Require: nbr_maxerreurs {paramètre 2}
Require:  $\hat{p}$  {PER mesuré}
Require:  $s_{pred}(t)$  {MCS prédit (actuel)}
Require:  $s_{pred}(t-1)$  {MCS prédit (précédent)}
    {Cette boucle est exécutée pour chaque TTI}
loop
  if ( $\hat{p} \geq \text{seuil\_defaillance}$ ) then
    if ( $(L(s_{pred}(t)) > 0)$  and ( $L(s_{pred}(t)) \geq L(s_{pred}(t-1))$ )) then
       $Nbr\_pred\_error \leftarrow Nbr\_pred\_error + 1$ 
      if  $Nbr\_pred\_error = nbr\_maxerreurs$  then
         $Nbr\_pred\_error \leftarrow 0$ ;
         $OUTPUT \leftarrow L^{-1}(L(s_{pred}(t-1)) - 1)$  {rétrograder le MCS}
      else
         $OUTPUT \leftarrow s_{pred}(t)$ 
      end if
    else
       $OUTPUT \leftarrow s_{pred}(t)$ 
    end if
  else
     $OUTPUT \leftarrow s_{pred}(t)$ 
  end if
end loop

```

3.3.3 Évaluation des performances

Dans le but d'évaluer la performance de la méthode de l'AMC intelligent, nous avons simulé le fonctionnement d'un système de transmission utilisant cette méthode. De la même

façon que pour la simulation de la différenciation par classe, nous avons considéré un évanouissement par bloc. Le canal utilisé est celui de Rayleigh. Les schémas de modulation et codage utilisés sont ceux du tableau 3.1. Les paramètres de la simulation sont présentés dans le tableau 3.3. Tout changement d'un de ces paramètres sera mentionné.

Dans les sections suivantes, nous allons comparer la performance de AMC intelligent à celles de :

- AMC classique ;
- AMC avec *offset* ;
- AMC parfait.

L'AMC classique est le schéma conventionnel de l'AMC, dans lequel le SNR mesuré au début de l'intervalle de transmission (TTI) est celui utilisé pour déterminer le schéma de modulation et de codage (MCS). L'AMC avec *offset* est identique à l'AMC classique, sauf que le SNR mesuré est toujours décrétementé par une constante (noté *offset*). Cela évite d'utiliser une valeur de SNR trop proche du seuil de changement de MCS. L'AMC parfait est un schéma idéal où nous supposons que l'évolution future du SNR est connue à l'avance. Ainsi, le BER_{max} est toujours respecté, et le problème de la variation du CSI est totalement résolu. L'AMC parfait est un schéma imaginaire utilisé pour connaître le niveau de performance maximal qui peut être atteint. Deux versions de l'AMC intelligent ont été utilisées, la première utilise un modèle d'extrapolation linéaire et la deuxième utilise un modèle en spline. De plus, nous avons présenté les performances de l'AMC intelligent lorsque seul l'engin d'extrapolation (EE) est actif (en pointillé dans les figures) afin de démontrer l'apport de l'engin stochastique (SE).

Disponibilité

Dans notre contexte la disponibilité mesure le ratio de temps où le canal peut être utilisé en respectant la contrainte sur le BER_{max} . Ainsi, nous considérons que nous avons une défaillance lorsque cette contrainte n'est pas respectée, et une récupération dès que la contrainte est de nouveau satisfaite. Par définition, la disponibilité est définie comme suit :

$$A = MTBF / (MTBF + MTTR)$$

avec :

A Disponibilité.

$MTBF$ Le temps moyen entre 2 défaillances (Mean Time Between Failures).

$MTTR$ Le temps moyen de récupération (Mean Time To Recover).

Tableau 3.3 Paramètres de la simulation

Paramètres	Valeurs
Durée de la simulation	120 s
Type du canal sans fil	Rayleigh
Fréquence Doppler (F_d)	100 Hz
SNR moyen à l'émetteur	20 dB
Durée du TTI	2 ms
Temps d'inter-arrivée des paquets	0.2 ms
Taille des paquets	1000 octets
Modèle d'extrapolation	Linéaire/Spline
Portée d'extrapolation	0.75
Taille de la mémoire pour extrapolation linéaire	1
Taille de la mémoire pour extrapolation spline	2
Offset	0.5 dB
Seuil de défaillance	0.8%
Nombre max d'erreurs	2

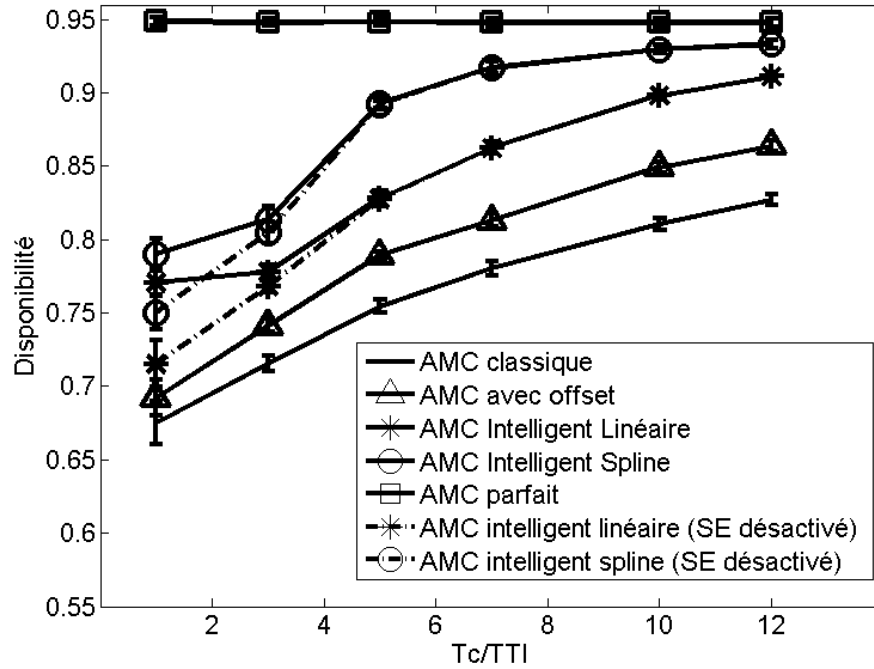


Figure 3.7 Disponibilité du canal(source [14]).

La figure 3.7 présente la disponibilité des différents schémas AMC en fonction du taux normalisé de mise à jour du CSI, exprimé par le rapport entre le temps de cohérence du canal et la période de transmission (T_c/TTI). Plus le rapport T_c/TTI est élevé, meilleur est notre perception du canal sans fil, car le nombre de mesures par temps de cohérence est plus grand. Nous rappelons que le temps de cohérence est la période de temps au-delà de laquelle nous estimons que l'état du canal a changé de façon significative (voir section 2.2.1). Les deux versions de l'AMC intelligent (linéaire et spline) améliorent la disponibilité du canal par rapport au schéma classique de l'AMC. L'AMC intelligent utilisant un modèle d'extrapolation en spline génère les meilleurs résultats, avec une augmentation de la disponibilité allant de 13% à 18.4% par rapport à l'AMC classique. La version utilisant le modèle d'extrapolation linéaire améliore entre 9.3% à 12.4% par rapport à l'AMC classique. Pour les petites valeurs de T_c/TTI , nous remarquons que la pente des deux courbes utilisant l'AMC intelligent est moins prononcée. Cela est dû à la contribution de l'engin stochastique (SE) dans la prise de décision. Les deux courbes en pointillé et avec les mêmes marqueurs que ceux de l'AMC intelligent, représentent la disponibilité quand seul l'engin d'extrapolation (EE) est actif. Il est à noter que pour l'AMC parfait, la disponibilité ne peut être affectée que par les périodes d'évanouissement profond du canal, où même le schéma de modulation et codage le plus robuste ne peut assurer le respect de la contrainte sur le BER_{max} .

Taux de perte de paquets

La figure 3.8 présente les résultats obtenus pour le taux de perte de paquets. Le PER est calculé suivant la même méthodologie que dans la section 3.2.3. Nous remarquons que les deux versions de l'AMC intelligent améliorent énormément le PER. En effet, le PER de la version linéaire est en moyenne 32.3% moins élevé que l'AMC classique. Pour la version utilisant l'extrapolation en spline, le PER est de 45.3% moins élevé. L'impact du SE sur les performances est visible pour $T_c/TTI \leq 3$.

De même que la disponibilité, les meilleurs résultats sont obtenus par la version spline de l'AMC intelligent. À partir de $T_c/TTI \geq 10$ l'AMC intelligent spline est à moins de 12.0% du PER réalisé par l'AMC parfait, ce qui peut être considéré très proche surtout lorsque nous le comparons avec les autres schémas. En effet, pour la même valeur de taux de mise à jours ($T_c/TTI \geq 10$), l'AMC avec offset et l'AMC classique génèrent respectivement un PER de 112.5% et 146.4% plus élevé.

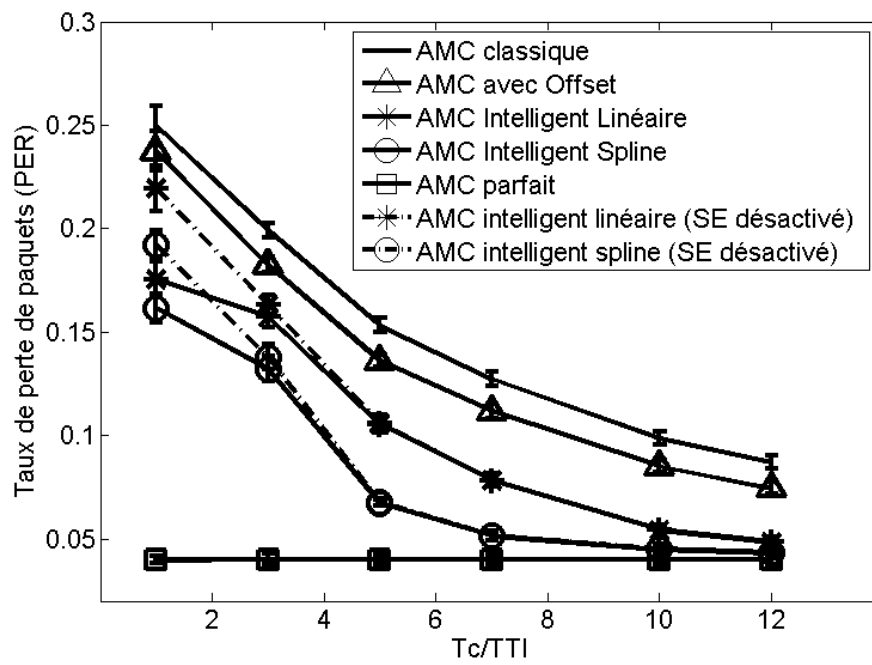


Figure 3.8 Taux de perte de paquets (source [14]).

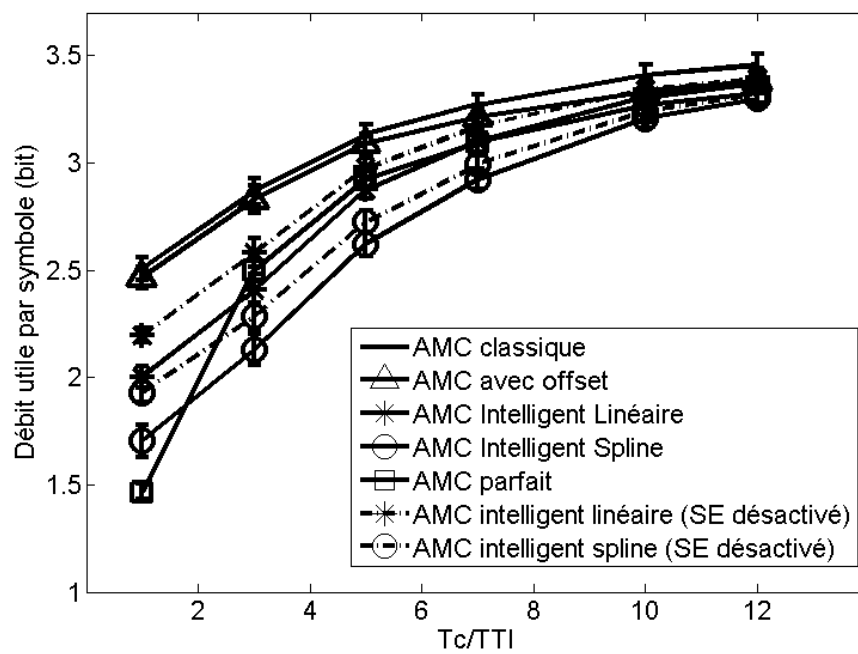


Figure 3.9 Débit utile par symbole (source [14]).

Débit utile par symbole

La figure 3.9 présente le débit utile par symbole pour les différents schémas AMC. Le débit utile par symbole est calculé de la même manière que dans la section 3.2.3. Le débit symbole de l'AMC parfait correspond au débit maximal que nous pouvons obtenir avec un respect absolu de la contrainte sur le taux d'erreur binaire maximal. Étant donné que pour l'AMC parfait le PER tend à être constant, l'augmentation des performances en fonction de T_c/TTI est due à l'amélioration du niveau d'adaptation aux conditions du canal. L'AMC parfait a un débit utile par symbole 11% moins élevé que celui de l'AMC classique.

Le débit utile de la version linéaire de l'AMC intelligent est 8.4% moins élevé que celui de l'AMC classique. En désactivant le SE (courbe en pointillé), le MCS prédit par le EE n'est plus susceptible d'être rétrogradé, et le débit par symbole augmente et n'est plus qu'à 5.2% du débit de l'AMC classique. Pour l'AMC intelligent utilisant une extrapolation en spline, le débit symbole a une diminution de 14.7% par rapport à l'AMC classique. En désactivant le SE, la diminution n'est plus que de 11.5%.

Impact des paramètres sur la performance

Dans le but de connaître l'impact des différents paramètres sur la performance de l'AMC intelligent, nous avons fait varier un paramètre à la fois en gardant les autres constants.

Portée d'extrapolation

Nous avons fait varier la valeur de la portée d'extrapolation pour deux versions de l'AMC intelligent ; l'une utilisant un modèle d'extrapolation linéaire et l'autre un modèle de spline. Cela nous permet de constater l'effet de la portée sur le taux de perte de paquets (PER), et son impact sur le débit utile par symbole. D'un autre côté, l'utilisation de deux modèles d'extrapolation nous permet de constater les différences de comportement de chaque modèle en fonction de la portée. La figure 3.10 présente l'effet de la portée sur le taux de perte de paquets. Les deux courbes montrent une amélioration du PER en fonction d'une valeur croissante de la portée. La méthode par spline génère les meilleurs résultats, quelque soit la valeur de la portée. Les deux courbes ont l'allure d'une exponentielle décroissante, avec une courbure plus prononcée pour la courbe de l'AMC intelligent utilisant le spline. Le pourcentage d'amélioration du PER tend à diminuer à partir de la valeur 0.75 de la portée pour la version en spline, et la valeur 1 pour la version linéaire.

L'impact de la portée sur le débit utile par symbole est présenté dans la figure 3.11. Les deux courbes montrent une diminution du nombre de bits par symbole. Cela est prévisible car plus la portée est grande, et plus la valeur extrapolée est distante par rapport aux valeurs

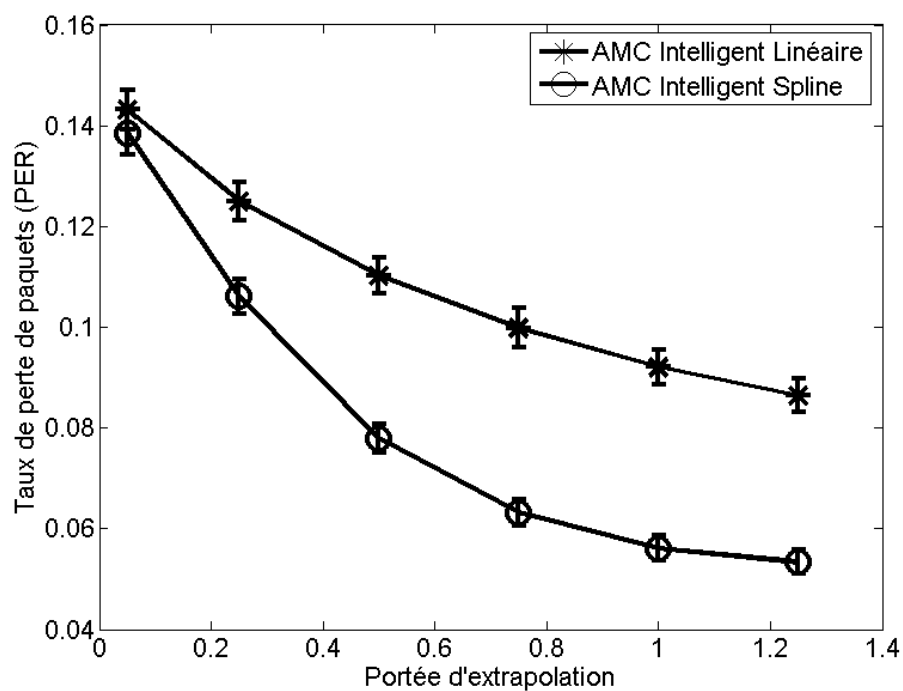


Figure 3.10 Impact de la portée d'extrapolation sur le taux de perte de paquets.

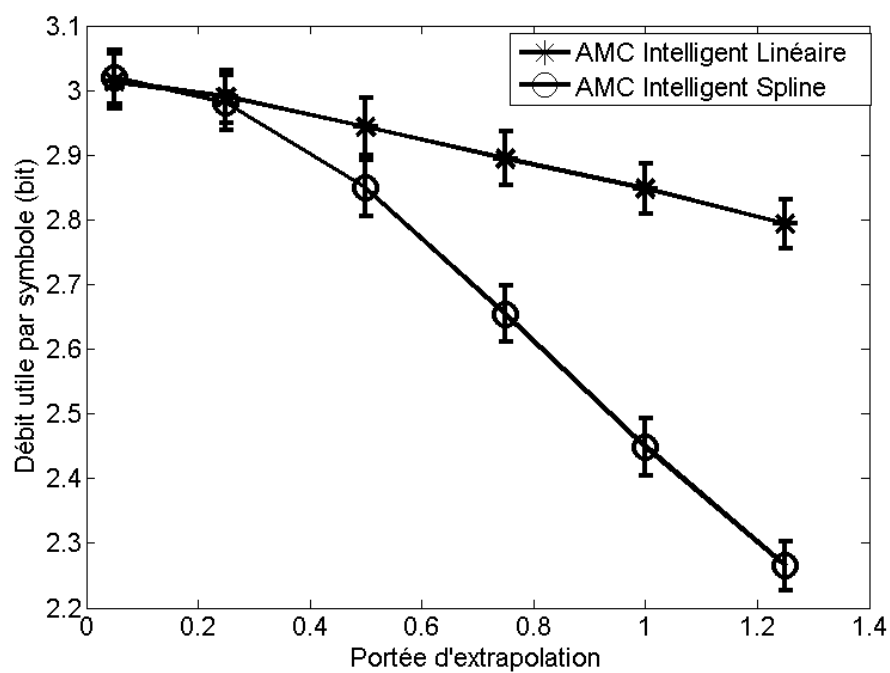


Figure 3.11 Impact de la portée d'extrapolation sur le débit utile par symbole.

connues de SNR. Le IE a alors tendance à générer des MCSs plus robustes, et donc moins de bits par symboles. Les deux courbes ont une allure pseudo linéaire décroissante. La pente la plus grande est celle utilisant le modèle en spline. La courbe du AMC intelligent linéaire a approximativement une pente de -0.2 (-20%), et celle en spline une pente de -0.77 (-77%).

Ainsi, nous pouvons conclure que le modèle d'extrapolation en spline est beaucoup plus sensible à la valeur de la portée. Les deux versions réalisent une amélioration du PER en fonction de la portée, mais la version en spline a une amélioration plus notable. D'un autre côté, la diminution du débit utile par symbole est aussi plus élevée pour le modèle en spline.

Offset

De même que pour la portée d'extrapolation, nous avons varié la valeur du paramètre *offset* de 0 à 2dB pour les deux modèles d'extrapolation. Comme nous l'avons vu dans la section 3.3.2, la valeur *offset* est utilisée pour prévenir le choix d'un MCS basé sur un SNR très proche du seuil de changement inférieur. Dans le cas de l'AMC intelligent, la valeur du SNR extrapolé est comparé à celle du SNR mesuré décrétementé par l'*offset*. Le EE choisi alors le minimum entre ces deux valeurs.

La figure 3.12 présente les résultats obtenus pour le taux de perte de paquets. Dans les deux cas de figure, le PER est décroissant en fonction de la valeur du paramètre *offset*. Les deux courbes obtenues sont linéaires décroissantes, avec un coefficient directeur plus élevé pour la version de l'AMC intelligent utilisant une extrapolation linéaire. La pente pour la version linéaire est de -0.02, et celle de la version spline est de -0.01. La différence est due au fait que la version en spline a moins tendance à utiliser le *offset* dans ces calculs, car la valeur extrapolée est en générale inférieure au SNR mesuré décrétementé par la constante *offset*.

La figure 3.13 présente l'impact du *offset* sur le débit utile par symbole. Les deux courbes de débit utile sont décroissantes avec une pente de -0.09. Ainsi, il est plus avantageux d'augmenter la valeur du paramètre *offset* pour le modèle linéaire que pour le modèle en spline, car pour la même valeur de perte de débit symbole, l'amélioration du PER sera plus notable pour le modèle linéaire.

Seuil de défaillance

Pour les simulations de l'impact du seuil de défaillance, nous avons augmenté la durée du TTI à 5 ms ($T_c/TTI = 2$). En diminuant le taux de mise à jour du SNR, la contribution de l'engin stochastique (SE) dans la prise de décision sera plus significative, et nous pouvons mieux apprécier l'impact du changement de ses paramètres. Le nombre maximal d'erreurs a été mis à 1, pour que le SE entre en action dès qu'une défaillance est détectée.

La figure 3.14 illustre le taux de perte de paquets (PER) en fonction du seuil de défaillance

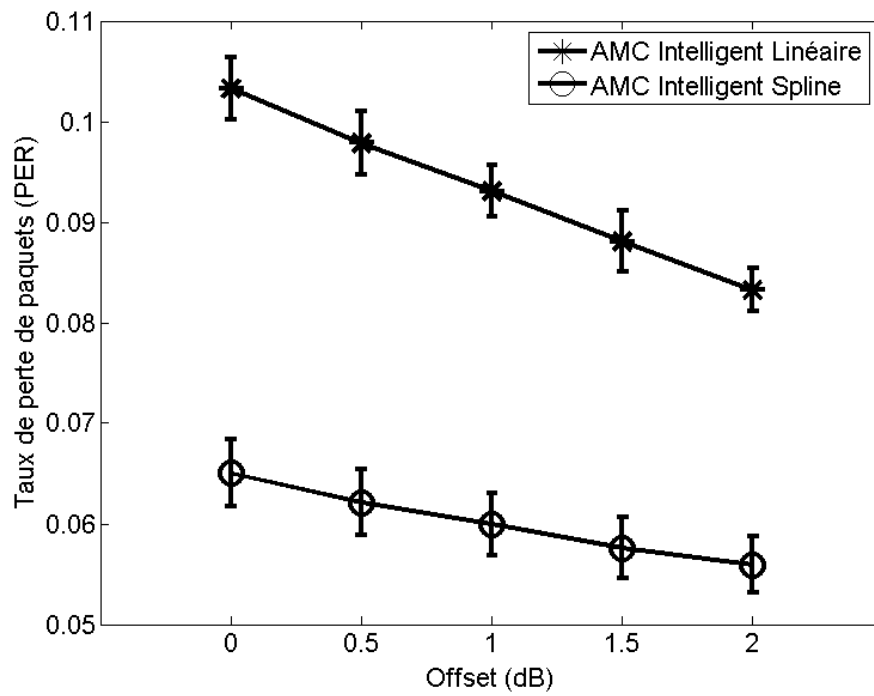


Figure 3.12 Impact du paramètre *offset* sur le taux de perte de paquets.

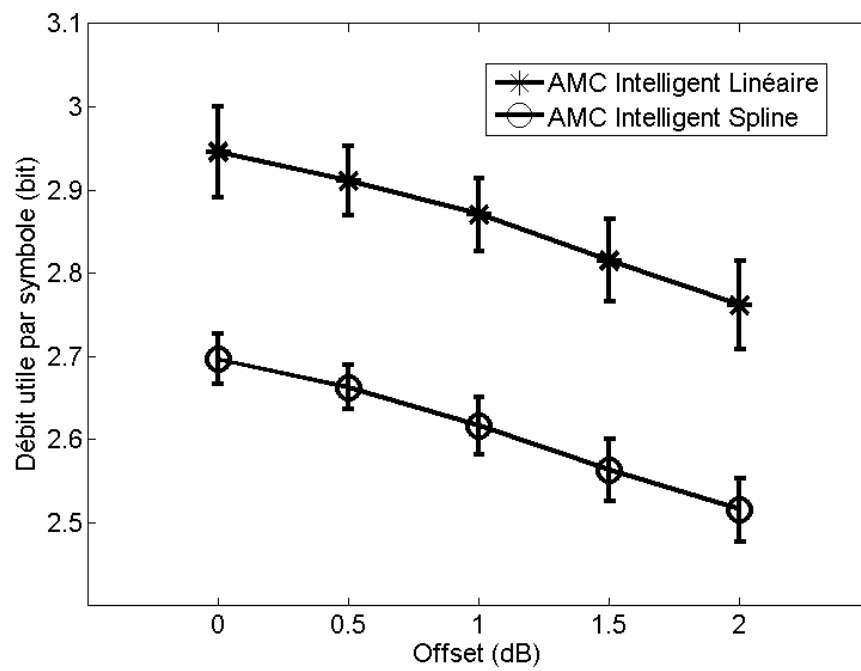


Figure 3.13 Impact du paramètre *offset* sur le débit utile par symbole.

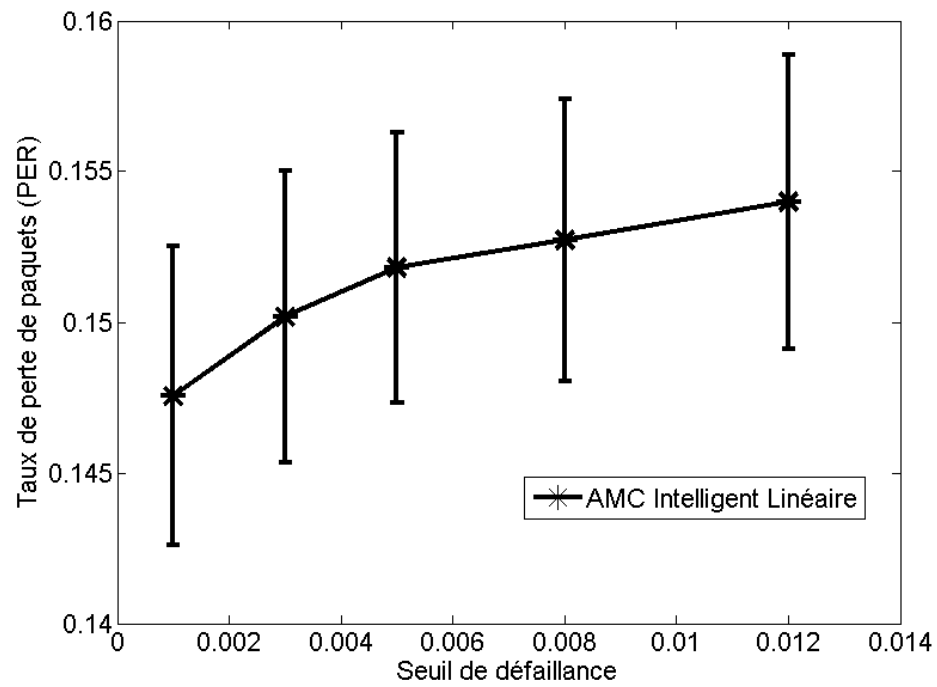


Figure 3.14 Impact du seuil de défaillance sur le taux de perte de paquets.

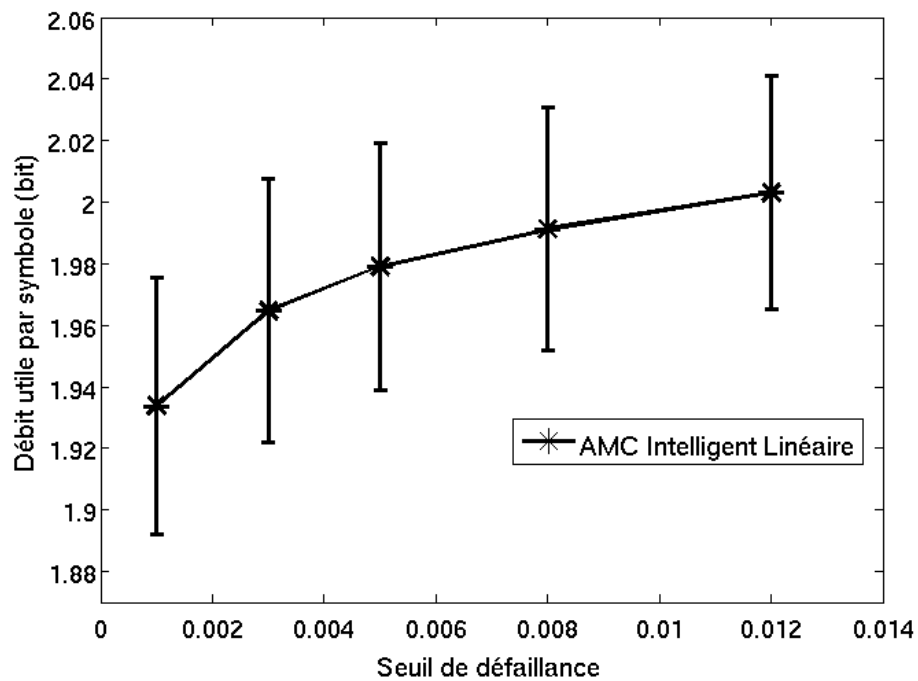


Figure 3.15 Impact du seuil de défaillance sur le débit utile par symbole.

pour l'AMC intelligent utilisant un modèle d'extrapolation linéaire. La courbe obtenue a une allure logarithmique, avec un PER qui augmente en fonction du seuil de défaillance. En effet, plus le seuil de défaillance est élevé et moins le SE va agir sur la prise de décision (voir algorithme 2). Concernant le débit utile par symbole (figure 3.15), nous remarquons que la courbe suit également une allure logarithmique. Le débit utile a tendance à augmenter en fonction du seuil de défaillance, car moins le SE est sollicité et moins le MCS est rétrogradé.

Nombre maximal d'erreurs

Pour les simulations du nombre maximal d'erreurs, nous avons gardé le TTI à 5 ms ($T_c/TTI = 2$) pour les mêmes raisons que précédemment. Le seuil de défaillance a été fixé à 0.8%. Cette valeur correspond au PER d'un paquet de 1000 octets, transmis avec un taux d'erreur binaire de 10^{-6} .

Comme nous l'avons présenté dans l'algorithme 2, le SE compare la valeur du PER mesuré avec le seuil de défaillance à chaque TTI. Si le PER mesuré excède le seuil de défaillance, le SE considère que le EE a pris une mauvaise décision concernant le choix du MCS. Dans ce cas, le nombre d'erreurs est incrémenté. Si ce dernier atteint le nombre maximal d'erreurs, le SE rétrograde le MCS prédit. Plus le nombre maximal d'erreurs est grand, et plus le SE sera permissif, et inversement.

La figure 3.16 présente l'impact du nombre maximal d'erreurs sur le PER. La courbe obtenue a une allure logarithmique, et augmente en fonction du nombre maximal d'erreurs. Nous remarquons qu'à partir de la valeur 2 de nombre maximal d'erreurs, l'augmentation du PER a tendance à diminuer. La figure 3.17 présente l'impact sur le débit utile par symbole. De même que le PER, cette courbe a une allure logarithmique, croissante en fonction du nombre maximal d'erreurs. En effet, un SE plus permissif agira moins souvent sur le MCS et le débit utile par symbole sera donc plus élevé.

3.4 DiffAMC

Le mécanisme de différenciation du niveau de la fiabilité DiffAMC utilise conjointement la différenciation par classe et par AMC intelligent pour générer plusieurs niveaux de fiabilité. Chaque niveau de différenciation est en fait la combinaison d'une classe AMC et d'un schéma de AMC intelligent.

Concernant la différenciation par classe AMC, nous pouvons générer plusieurs niveaux de fiabilité en nous basant sur la valeur du BER_{max} , comme nous l'avons fait dans la section 3.2. Pour la différenciation par AMC intelligent, nous avons étudié dans la section 3.3 les caractéristiques de cette méthode et l'impact des différents paramètres sur le niveau de fiabilité. En se basant sur les résultats obtenus, nous pouvons distinguer deux grandes familles de

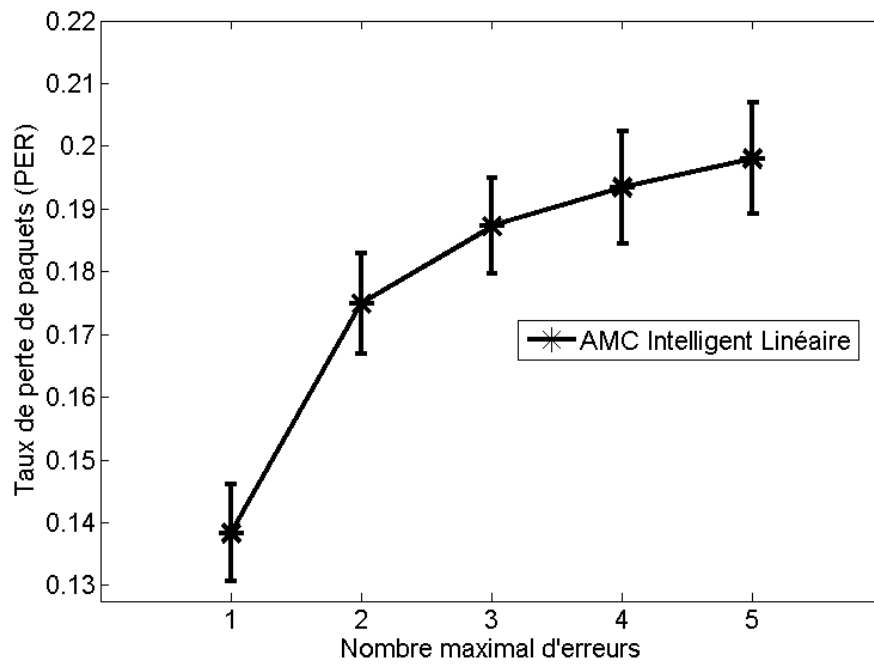


Figure 3.16 Impact du nombre maximal d'erreurs sur le taux de perte de paquets.

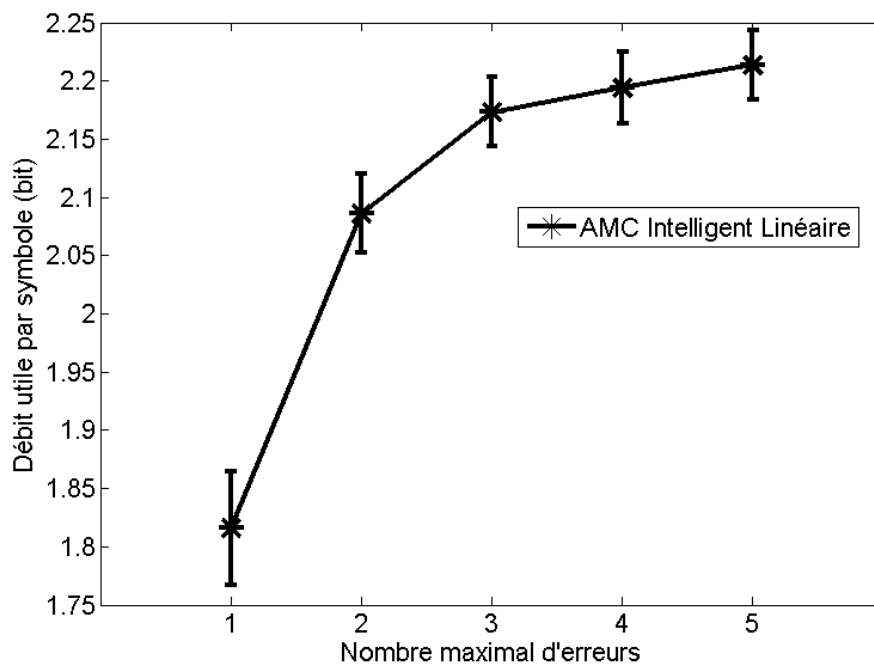


Figure 3.17 Impact du nombre maximal d'erreurs sur le débit utile par symbole.

différenciation par AMC intelligent, basées sur la variation du modèle d'extrapolation linéaire et en spline. À partir de là, nous pouvons utiliser les autres paramètres pour affiner le niveau de fiabilité voulu.

Ainsi, pour la différenciation par classe, nous proposons 7 classes AMC, avec un BER_{max} allant de 10^{-3} à 10^{-9} . Concernant la couche de différenciation par AMC intelligent, nous proposons 4 schémas présentés dans le tableau 3.5.

Dans le schéma 1, le moteur intelligent est désactivé afin de générer un AMC classique. Le schéma 2 utilise une version linéaire dont les paramètres ne sont pas au maximum, et avec un engin stochastique désactivé. Le schéma 3 est aussi une version linéaire, mais avec des paramètres poussés au maximum pour améliorer le PER. Finalement, le schéma 4 utilise une extrapolation en spline et des paramètres réglés pour avoir un niveau de protection accru. La figure 3.18 présente le schéma fonctionnel de DiffAMC, avec les différentes combinaisons possibles.

Avec la configuration que nous avons proposé, 28 combinaisons sont possibles. Néanmoins, en augmentant ou en diminuant le nombre de classes et de schémas, nous pouvons varier le nombre de combinaisons possibles selon nos besoins de différenciation.

Les simulations réalisées utilisent les paramètres présentés dans la section 3.3.3 (tableau 3.3). La figure 3.19 présente le taux de perte de paquets pour les 28 combinaisons proposées. Les combinaisons sont groupées par classe AMC. Dans chaque groupement, nous avons représenté les 4 schémas AMC intelligent. Nous remarquons que pour chaque classe AMC, le PER mesuré est décroissant en fonction des schémas. La même constatation est valide pour les schémas en fonction des classes. Nous remarquons aussi que plus le niveau de la classe est élevé, et plus les différences entre les schémas sont minimes. Ainsi pour la classe 1 l'amélioration moyenne entre deux schémas est de 28%, contre 23% pour la classe 7. Entre le niveau de différenciation le moins fiable (combinaison de classe 1 avec schéma 1), et le plus fiable (combinaison de classe 7 et schéma 4) le PER diminue de 86.1% ($PER(schema1, classe1) = 0.317$ et $PER(schema4, classe7) = 0.044$).

Tableau 3.5 Schéma de différenciation par AMC intelligent.

Paramètres	Schéma 1	Schéma 2	Schéma 3	Schéma 4
EE	inactif	actif	actif	actif
Modèle d'extrapolation	-	linéaire	linéaire	spline
Offset	-	0.5	1.5	1
Portée d'extrapolation	-	0.1	0.95	0.75
SE	inactif	inactif	actif	actif
Seuil de défaillance	-	-	0.8%	0.8%
Nombre max d'erreurs	-	-	3	2

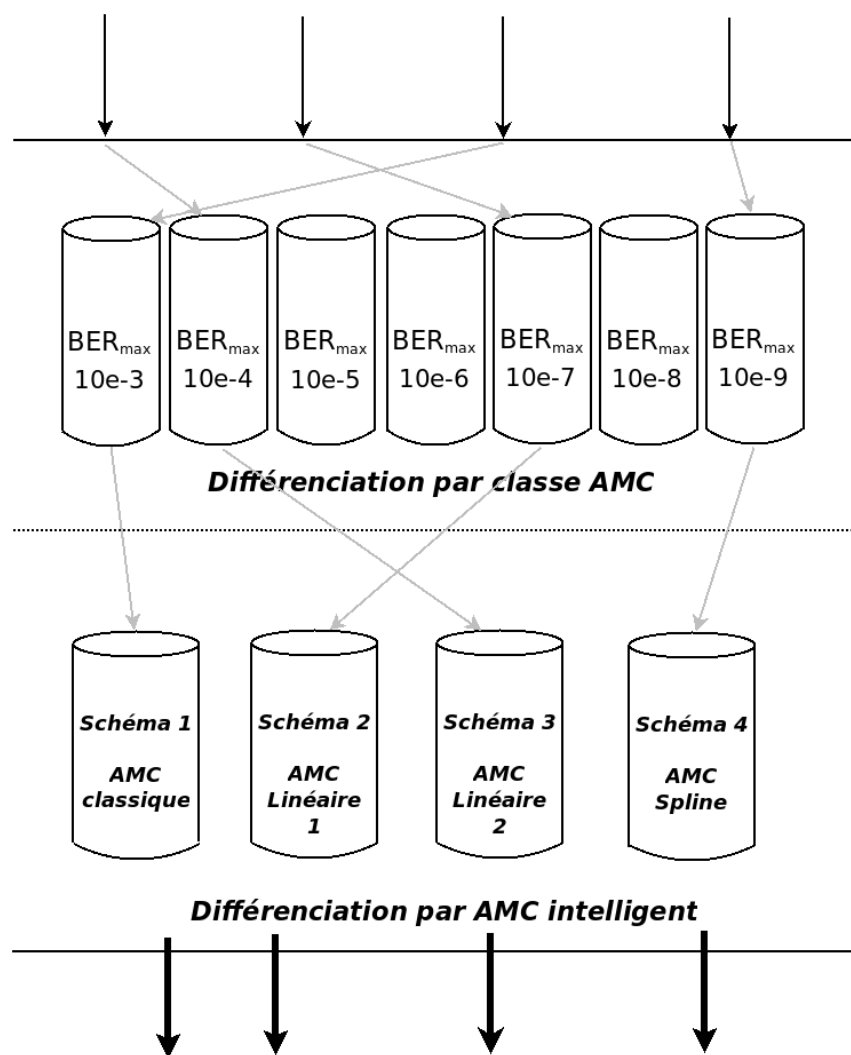


Figure 3.18 Schéma fonctionnel de la couche DiffAMC.

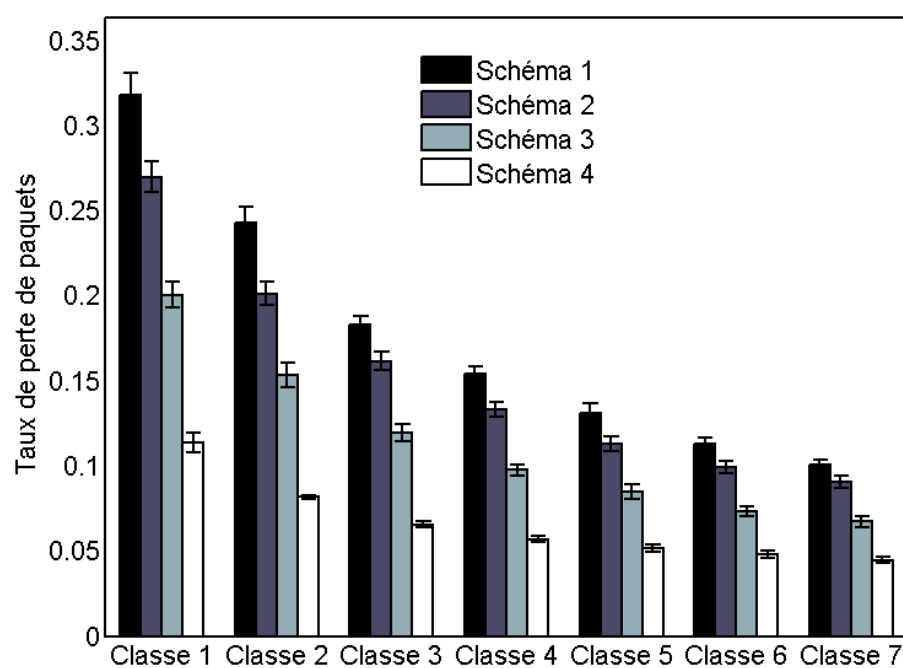


Figure 3.19 Taux de perte de paquets pour les différentes combinaisons de différenciation DiffAMC.

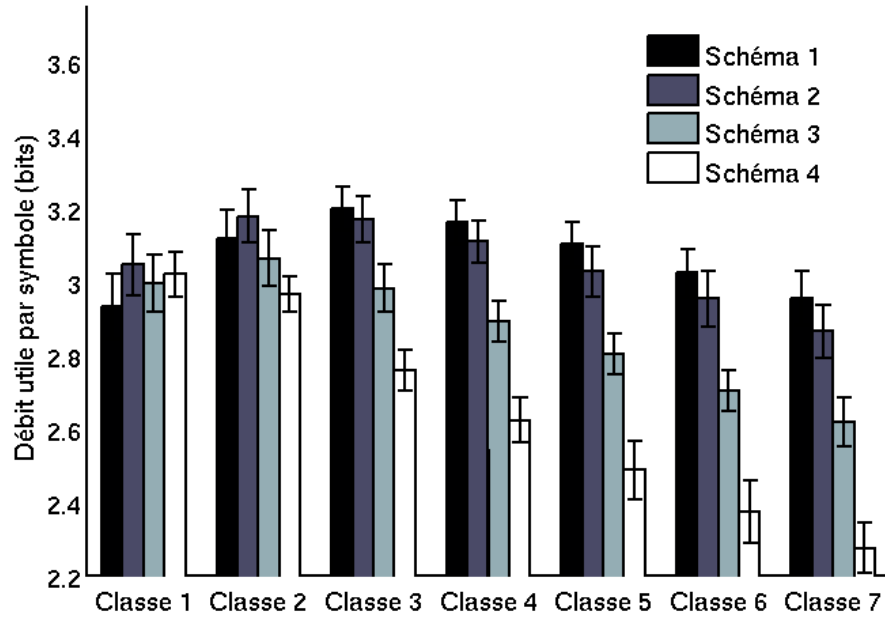


Figure 3.20 Débit utile par symbole pour les différentes combinaisons de différenciation Dif-fAMC.

La figure 3.20 présente l'impact de l'utilisation de chaque combinaison sur le débit utile par symbole. En se basant sur ces résultats, nous pouvons éventuellement affecter le niveau de fiabilité souhaité tout en considérant la diminution du débit utile qui va être engendrée. Le meilleur débit est réalisé par le niveau de différenciation utilisant la classe 3 et le schéma 1 (3.178 bits/symbole). Dans le cadre de notre simulation, les classes 1 et 2 ne sont pas efficaces quel que soit le schéma AMC utilisé. Cela est dû à la taille des paquets utilisés dans la simulation, qui sont inadaptés pour le BER_{max} utilisé par les classes 1 et 2. Dans le cadre de notre simulation une seule taille de paquet a été utilisée. Ces résultats sont susceptibles de changer en fonction de la taille des paquets. Dans d'autres circonstances, ces classes auraient pu générer un bon compromis entre PER et débit symbole. Néanmoins, nous remarquons que même dans les classes 1 et 2, les schémas de AMC intelligent arrivent à améliorer non seulement le PER, mais le débit utile par rapport au schéma 1 (AMC classique). Dans les classes allant de 3 à 7, le schéma 1 produit toujours le meilleur débit utile. La diminution moyenne du débit entre deux schémas est de 7.75%.

Ainsi, dans le cadre de notre simulation, toute augmentation de niveau de fiabilité Dif-fAMC nous fait gagner en moyenne 26.6% en PER, et nous fait perdre 7.75% en débit utile par symbole.

3.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre DiffAMC, le mécanisme de différenciation de niveau de fiabilité pour l'AMC. Nous avons commencé par présenter et évaluer la première sous-couche de différenciation par classes AMC. Puis, nous avons étudié la deuxième sous-couche basée sur le méthode de AMC intelligent [14]. Finalement, en nous basant sur les résultats de simulation, nous avons proposé un ensemble de classes AMC et de schémas AMC intelligent, dont la combinaison nous offre plusieurs niveaux de différenciation.

Tous les tests et simulations effectués dans ce chapitre ont été réalisé en utilisant l'outil MATLAB. Nous avons utilisé des scénarios de simulation simples, et uniquement un trafic à débit constant. Cette étape de recherche et conception nous a permis dans un premier temps de découvrir et d'explorer les différentes facettes des problèmes que nous avons proposés. Dans un deuxième temps, cela nous a permis de tester et d'évaluer les différentes options, puis d'élaborer les algorithmes à utiliser. Le processus que nous avons utilisé nous a permis de gagner en temps et en flexibilité.

Néanmoins, afin de valider les résultats de notre mécanisme de différenciation, nous devons réaliser des simulations dans un environnement beaucoup plus réaliste. Nous devons utiliser des types de trafics réalistes, véhiculé dans des classes de qualité de services, et en considérant les messages de gestion du standard, ainsi que ses différentes spécificités. Nous devons considérer les schémas de modulation et codage utilisés par le standard simulé, et un canal sans fil utilisé dans l'évaluation de standards de communications. Jusqu'à présent, l'impact négatif sur les performances est perçu à travers la diminution du débit utile par symbole. Mais réellement, ce qui compte le plus c'est l'effet de l'utilisation de DiffAMC sur l'occupation de la bande passante du système, et son impact sur la capacité du système.

Nous allons présenter dans le chapitre suivant, la plateforme de simulation que nous avons conçu et implémenté, afin de valider les performances du mécanisme DiffAMC, en les projetant dans un environnemt réaliste.

CHAPITRE 4

PLATEFORME DE SIMULATION

Ce chapitre décrit la plateforme que nous allons utiliser dans les simulations du chapitre 5. Suite à une brève introduction, nous présentons dans la section 4.2 le simulateur ns-2. Ensuite, nous détaillons dans la section 4.3 la méthodologie adoptée pour l'intégration du support du canal sans fil dans l'extension PolyMAX. La section 4.4 illustre la technique d'analyse des résultats de simulations. Finalement, la section 4.5 présente les modèles de trafic qui vont être utilisés dans les simulations.

4.1 Introduction

Les simulations effectuées dans ce projet de maîtrise ont été réalisées à l'aide du simulateur de réseaux ns-2 (Network Simulator). Afin d'adapter ce simulateur à nos besoins, nous avons ajouté des fonctionnalités supplémentaires. En premier lieu, nous avons intégré le module PolyMAX [15] afin de simuler le fonctionnement d'un réseau WiMAX mobile sur ns-2. Par la suite, nous avons ajouté le support du canal sans fil à PolyMAX afin de pouvoir tester les performances de DiffAMC dans un environnement réaliste. Ce chapitre détaille la méthodologie empruntée pour implémenter notre plateforme de simulation.

4.2 Simulateur de réseaux ns-2

Ns-2 est un simulateur libre (*open source*) et gratuit, largement utilisé par la communauté scientifique. Il constitue un outil de simulation important pour les réseaux filaires et sans fil, locale et par satellite. Le caractère libre et gratuit de ns-2 est une arme à double tranchant. En effet, bien que ns-2 ait atteint un bon niveau de maturité, il ne peut pas être considéré comme un produit fini et exempt d'erreurs. C'est le résultat d'un effort continu de recherche et de développement, et les utilisateurs sont les seuls responsables de déceler et de corriger d'éventuels bogues. Ceci n'est pas le cas, par exemple, des simulateurs commerciaux où l'éditeur est tenu de fournir un produit fini. Ces simulateurs ont souvent un service de soutien aux utilisateurs et des corrections de bogues très fréquentes.

Malgré ces inconvénients, ns-2 reste un choix très judicieux pour la recherche dont l'efficacité a été largement démontrée. Il est vrai que les simulateurs commerciaux sont en général plus stables, et offrent une interface utilisateur plus simple et attrayante. Cependant, tout se

complice dès qu'il s'agit de modifier le code source ou d'ajouter des modules supplémentaires. En effet, les simulateurs commerciaux contiennent souvent des portions de code non modifiables, ou cachées comme le Simulateur Opnet, par exemple, ce qui peut compliquer toute extension. Cela n'est pas le cas de ns-2, dont tout le code source est fourni et commenté, et dont la conception orientée objet facilite la réutilisabilité du code et sa modularité. Le modèle hiérarchique de ns-2 facilite l'implémentation des modules d'extension pour ajouter des nouvelles technologies et standards. De plus, son utilisation permet d'éviter de se préoccuper des problèmes liés aux licences et aux droits de publications qu'implique l'utilisation d'un simulateur commercial.

4.2.1 Description de ns-2

Ns-2 est un simulateur à évènement discret. Tous les paquets sont identifiables par un numéro unique, et chaque paquet émis ou reçu par un nœud est inscrit dans le fichier trace. Cette propriété du simulateur facilite énormément l'analyse des résultats. Un interpréteur en OTcl (Object-oriented Tool Command Language) permet à l'utilisateur de spécifier la topologie du réseau et le scénario de la simulation. Le code source du simulateur est écrit en C++, avec des interfaces modifiables via des fonctions membres et des classes OTcl. Ainsi les fonctionnalités ajoutées au simulateur doivent avoir une interface C++, pour l'interaction avec les classes du simulateur, et une interface OTcl pour l'interaction avec l'utilisateur.

4.2.2 Limitations de ns-2

Dans le cadre de notre projet, nous pouvons identifier deux limitations majeures de ns-2 qu'il faut combler :

1. ns-2 ne supporte aucun standard de communications pour réseau sans fil étendu ;
2. le canal radio dans ns-2 est quasi-inexistant ;

En effet, le simulateur ns-2 offre une implémentation très simple de la couche physique, et un niveau d'abstraction très élevé. Des caractéristiques indispensables de la propagation d'ondes comme le phénomène de multitrajets et la variation dans le temps du canal sans fil n'existent. Seuls trois modèles simples de propagations à grande échelle, espace libre, réflexion sur le sol et shadowing, sont implémentés avec des possibilités de configurations très limitées. Aucun modèle de propagation à petite échelle, très utile pour la conception et l'étude de performance de systèmes sans fil, n'est implémenté.

Ces deux limitations vont être abordées dans la section suivante. L'ajout du module PolyMAX nous permet de simuler des Réseaux WiMAX mobiles avec une couche physique supportant un canal sans fil évolué et hautement modulable.

4.3 Intégration du support du canal sans fil dans PolyMAX

PolyMAX [15] est un module de simulation du standard WiMAX mobile (802.16e) que nous avons développé et amélioré durant ce projet de maîtrise. Initialement basée sur le code source du module NIST [49], PolyMAX intègre plusieurs fonctionnalités du standard 802.16e [4] (WiMAX mobile). Le tableau 4.1 résume les principales fonctionnalités disponibles et absentes de PolyMAX par rapport aux spécifications du standard.

Tous les détails de la conception, de l'implémentation et de la validation de module PolyMAX sont présentés dans [15]. Nous allons présenter uniquement les nouvelles fonctionnalités qui ont été ajoutées à la version publiée de PolyMAX (version 2), à savoir :

- le support d'un canal sans fil évolué ;
- le support du mécanisme DiffAMC.

En effet, bien que PolyMAX supporte la couche physique WirelessMAN-OFDM de WiMAX, il utilise le modèle de canal de ns-2. Le support de la couche physique inclut la gestion des symboles OFDM, la bande passante, les schémas de modulation et codage, etc. La gestion de la bande passante sert à déterminer le nombre total des symboles OFDM, et le nombre de symboles utilisé en fonction de la taille du paquet et du type de modulation et codage utilisés. Par contre, la gestion des erreurs de transmission est inexistante ; les pertes de paquets sont uniquement dues à des paquets rejetés dans les files d'attente. Cependant, dès que la trame quitte la couche physique, les classes ns-2 prennent le relai, et comme nous l'avons mentionné, aucun canal sans fil n'est implémenté dans ns-2.

4.3.1 Implémentation du canal sans fil

Ajout du canal sans fil

Dans ns-2, les données transmises dans un paquet sont une quantité fictive. En effet, le paquet ne contient pas de données, mais uniquement sa taille qui sert à calculer, entre autres, la durée de transmission du paquet. Dans ns-2, à chaque paquet est associé un entête spécial contenant des informations concernant le paquet et cet entête n'est pas pris en compte dans le calcul de performance. La taille du paquet est inscrite dans cet entête (**cmn_hdr**). Par conséquent, nous ne pouvons pas envisager une simulation où l'état du canal sans fil influence directement les symboles transmis. Nous devons estimer le taux de perte de paquets (PER) relatif à chaque paquet, et décider si le paquet est correctement reçu ou non.

La figure 4.1 illustre le cheminement nécessaire pour déterminer la probabilité de perte d'un paquet. Le PER (6) est fonction du taux d'erreur binaire (BER) et de la taille du paquet qui peut être extraite de l'entête **cmn_hdr** (1). Pour avoir le BER (5), nous devons connaître le SNR instantané au moment de l'envoi du paquet (3), ainsi que la relation entre le SNR

Tableau 4.1 Sommaire des fonctionnalités de PolyMAX.

Fonctionnalités disponibles	Fonctionnalités manquantes
<ul style="list-style-type: none"> – Duplexage temporel (TDD) avec un ratio variable – Couche physique OFDM – Topologie PMP – Procédure de handover et gestion de la mobilité – Messages de gestion d'entrée au réseau – Fragmentation et assemblage des paquets – Taille de trames variables – Messages de création et de gestion des connexions – Messages de création et de gestion des flux de données – Support des 5 classes de QoS de WiMAX mobile – Tous les paramètres des classes de QoS sont supportés et configurables – Support de l'adaptation de la modulation et de codage (AMC) 	<ul style="list-style-type: none"> – Duplexage fréquentiel (FDD) – Couche physique OFDMA – Topologie mesh – Packing – Requête automatique de répétition (ARQ) – Canal sans fil

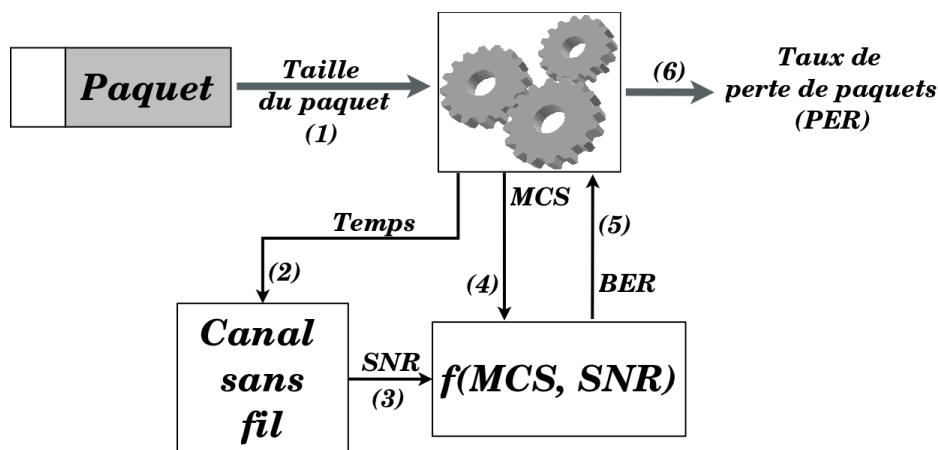


Figure 4.1 Estimation du PER d'un paquet.

et le BER. Cette relation dépend du schéma de modulation et de codage utilisé (MCS). Par conséquent, le MCS courant (4) lorsque le paquet est envoyé est requis pour ce calcul. En conclusion, l'ajout du canal sans fil nécessite l'implémentation de mécanismes permettant d'avoir :

- le SNR instantané lors de la transmission d'un paquet ;
- le BER en fonction du SNR pour l'ensemble des MCS supportés.

Solution proposée

À première vue, la solution la plus évidente serait d'implémenter dans ns-2 un modèle de canal sans fil (Rayleigh par exemple). Nous pouvons ensuite choisir les paramètres du canal (SNR moyen, fréquence Doppler, etc) via des fonctions d'interfaçage OTcl de ns-2. Chaque station d'utilisateur (SS) aura son propre canal sans fil, qui va générer le SNR en fonction du temps. Ce processus présente trois inconvénients. Le premier est que dans ce scénario, le type de canal est fixe et codé en dur en C++. Nous pouvons bien sûr implémenter plusieurs types de canaux, mais jamais tous. À chaque fois qu'un utilisateur voudrait utiliser un autre canal, il doit modifier le code source. Le deuxième inconvénient est qu'il faut générer le canal en utilisant des fonctions mathématiques de bases fournies dans C++. Cela contribuerait à ralentir le cycle de développement, et à éventuellement diminuer le nombre de canaux que nous pouvons proposer. Ajouter une bibliothèque spéciale, va réduire la portabilité de notre code. Le troisième inconvénient est l'augmentation du temps de simulation. En effet, le SNR va être calculé pour chaque paquet de chaque utilisateur, et cela va augmenter de façon très grande le temps de simulation.

La solution que nous proposons est de précalculer la réalisation du canal sans fil, avant la simulation de ns-2. La réalisation du canal de chaque station est sauvegardée dans un fichier, que ns-2 utilise pour importer le SNR en fonction du temps. Une fonction d'interface OTcl permet d'associer chaque fichier canal (.chn) à une station. Ainsi, le premier inconvénient est résolu, car l'utilisateur peut générer le canal qu'il veut. Ce dernier peut être généré en utilisant des outils spécialisés pour la simulation des canaux (MATLAB par exemple), où nous pouvons même y inclure des scénarios où le type et les paramètres du canal changent au cours du temps. L'autre avantage est que nous pouvons utiliser dans nos simulations des enregistrements de mesures réelles du canal. Le deuxième inconvénient est aussi surpassé, car les outils spécialisés bénéficient de fonctions de haut niveau permettant la réalisation très aisée de tous types de canaux. Le troisième inconvénient, concernant l'augmentation du temps de la simulation, est largement résolu. Pour comparer les performances de notre simulateur, nous avons pris l'exemple du simulateur de WiMAX utilisant un canal Rayleigh (avec des paramètres fixes) présenté dans [33]. Ce simulateur est basé, comme PolyMAX,

sur le code source de NIST. Pour simuler 10 secondes avec 30 stations BE (Best Effort), ce simulateur prend 1300 secondes [33] alors qu'il ne supporte ni la qualité de service ni l'AMC comme notre simulateur. Dans les mêmes conditions, notre simulateur, avec support du canal sans fil et AMC (PolyMAX v3), prend 182 secondes.

De même que pour le canal sans fil, nous avons choisi de précalculer les courbes du BER en fonction du SNR et de les sauvegarder dans des fichiers (.mcs). Ainsi, nous allons bénéficier des mêmes avantages que pour la génération du canal. Chaque fichier contient les résultats d'un MCS particulier (BER en fonction du SNR).

Fonctionnement

La figure 4.2 présente le schéma fonctionnel de la méthode utilisée pour l'implémentation du canal sans fil. Une réalisation du canal voulu est sauvegardée dans un fichier (1). Nous avons défini un nouveau format de fichier (.chn) où la première ligne contient la description du canal, et le reste est composé de deux colonnes, une pour le temps et l'autre pour le SNR. Le canal peut être généré par simulation ou par mesures réelles. Un ensemble de fichiers de MCS est aussi généré (2). Les fichiers contiennent le BER en fonction du SNR, pour chaque MCS. Les fichiers MCS (.mcs) ont le même format que les fichiers du canal (.chn).

La classe **SS_802.16** responsable de la couche MAC dans la station utilisateur (SS), charge le fichier du canal pour chaque utilisateur (3) et les fichiers des MCS (4) une seule fois au début de la simulation. Ces fichiers sont complètement chargés dans la mémoire vive (RAM) pour accélérer l'accès à ces données. La fonction **load_Channel** que nous avons intégrée à la classe **SS_802.16** est responsable du chargement du canal. Cette fonction vérifie automatiquement le taux d'échantillonnage du canal enregistré dans le fichier. Si ce taux est constant, alors **load_Channel** charge uniquement dans la mémoire la colonne de SNR. L'index est calculé en divisant le temps par le taux d'échantillonnage. Si le taux d'échantillonnage n'est pas constant, les deux colonnes (SNR et le temps) sont chargées. Il est à noter que cette procédure est appliquée pour chaque station d'utilisateur. La fonction **load_Channel** est aussi capable de détecter si l'utilisateur a changé le fichier canal au cours de la simulation. Dans ce cas, elle charge automatiquement le nouveau fichier dans la RAM.

Les fichiers MCS sont aussi chargés par **SS_802.16** de la même façon que pour le fichier du canal. La fonction ajoutée pour cela est **load_MCS**. La même technique que précédemment est utilisée pour accélérer l'indexation.

Une fois le canal chargé dans la RAM, la classe **SS_802.16**, peut désormais utiliser la fonction **Channel_getSNR** pour avoir le SNR en fonction du temps. Le temps de début de transmission du paquet est utilisé pour avoir le SNR. Le MCS utilisé dans la trame WiMAX courante est transmis par la classe responsable de la couche MAC à la station de

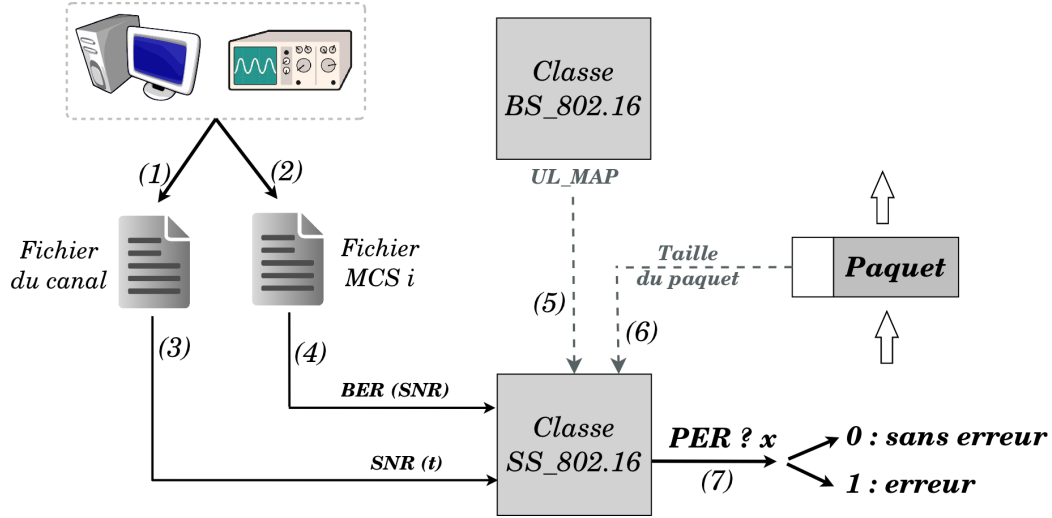


Figure 4.2 Schéma fonctionnel de la méthode utilisée pour l'implémentation du canal sans fil.

base **BS_802.16**, via le message **UL_MAP** (5). Connaissant le MCS et le SNR, **SS_802.16** utilise la fonction **getBER** pour récupérer le BER.

Un pointeur vers l'entête du paquet en traitement nous permet de récupérer la taille du paquet(6). Ayant le BER et la taille du paquet (noté L), **SS_802.16** calcule le PER comme suit :

$$PER = (1 - (1 - BER)^L)$$

La prise de décision concernant la perte ou non du paquet est calculée comme suit. Une variable aléatoire de distribution uniforme $x \in [0, 1]$, est générée. Elle est ensuite comparée à la probabilité de perte de paquets (7) :

$$\begin{cases} x \leq PER & \text{Erreur de transmission} \\ x > PER & \text{Pas d'erreurs} \end{cases}$$

Nous avons modifié l'entête de paquet de ns-2 en ajoutant un nouveau champ appelé (**chan_error**). Ce champ est initialisé avec la valeur 0. Dans le cas d'une erreur de transmission du paquet, ce champ est mis à 1. Cette opération est effectuée pour chaque paquet.

Modification des fonctions de réception

Nous avons modifié la fonction **sendUp**, responsable de la réception des paquets au niveau de la couche MAC, dans les classes **BS_802.16** et **SS_802.16**. Ainsi, les paquets marqués (**chan_error = 1**) vont être supprimés et ne vont pas être transmis à la couche IP. La fonction

drop de la classe **mac** de ns-2 a été mise à jour avec un nouveau critère de suppression de paquet, que nous avons noté **CHN**.

Modification des traces ns-2

Une nouvelle cause de perte de paquet a été ajoutée dans la trace de ns-2, que nous avons noté **CHN**. Dans ns-2, chaque perte due au canal est spécifiée dans les traces et non dans un fichier à part, comme d'autres simulateurs. Ceci simplifie énormément l'analyse des résultats. Le tableau 4.2 présente 2 lignes extraites du fichier trace de ns-2. La première ligne annonce un événement de suppression de paquet (d : drop, suppression), avec la raison CHN (Erreur de transmission) en provenance de la station 1, au niveau de la couche MAC de la station 2. Le paquet rejeté est une requête ARP. La deuxième ligne montre une suppression de paquet de type vidéo de taille 1526 octets, pour la même raison.

Interface utilisateur

Du point de vue de l'utilisateur, l'utilisation du canal est effectuée à l'aide de deux fonctions OTcl :

- **set-CHN** <num SS> <chemin>
- **set-mcs-folder** chemin>

L'exemple suivant illustre l'utilisation des ces fonctions :

```
[$bs_sched] set-CHN $SS(1) /bgs/ns-2.34/wimax/channel/channel_3gppTux.chn
[$SS(1)] set-mcs-folder /bgs/ns-2.34/wimax/wimax_mcs/
```

La fonction **set-CHN** sert à spécifier l'emplacement du fichier canal pour chaque SS. Cette fonction est l'équivalent OTcl de la fonction **load_Channel**. Elle prend 2 arguments ; le numéro de la station d'utilisateur (**SS(1)** dans l'exemple), et le chemin du fichier. Le numéro d'utilisateur est nécessaire, car cette fonction est interfacée via la classe d'ordonnancement de la station de base (**bs_sched** dans l'exemple), et non pas par une classe de la station d'utilisateur.

Tableau 4.2 Exemple de trace ns-2 avec gestion du canal.

Évènement	Temps	Src	Dest	Couche	Raison	Type	Taille
d	30.424451862	1	2	MAC	CHN	arp	-
d	30.564640088	1	2	MAC	CHN	vidéo	1526

La fonction **set-mcs-folder** est utilisée pour spécifier le chemin du répertoire contenant les fichiers MCS. Le module PolyMAX est capable de reconnaître automatiquement les MCS en lisant la description dans la première ligne de chaque fichier.

Dans le cas où ces 2 fonctions ne sont pas appelées dans le script ns-2, PolyMAX n'utilisera pas de canal sans fil, et générera un message dans le fichier de débogage indiquant cela. Cela garantit aussi la portabilité des scripts de la version 2 de PolyMAX qui ne supporte pas la gestion du canal sans fil.

4.3.2 Génération des fichiers du canal et des MCS

Génération des fichiers du canal

Dans le cadre de notre projet de maîtrise, nous avons généré les fichiers de canal en utilisant MATLAB. Nous avons utilisé les classes de génération de canal disponibles dans le **Communication System Toolbox**. La classe **stdchn** nous a permis de construire des objets de canal à partir de série de modèles de canaux standardisés. Plusieurs modèles de canaux à évanouissements sont disponibles (avec tous les profils) :

- COST 207
- GSM/EDGE
- 3GPP
- TU-R 3G
- TU-R HF
- HIPERLAN/2
- 802.11
- etc.

L'objet canal est construit avec **stdchn** en spécifiant le type et le profil du canal, ainsi que la fréquence Doppler et le temps d'échantillonnage. Une fois l'objet canal construit, nous utilisons la fonction membre **filtre** pour extraire le gain du canal (h) pour la durée de temps souhaitée. Connaissant la puissance de transmission moyenne (P_{tr}), et la variance du bruit gaussien (σ_w^2) . nous pouvons déduire le SNR instantané ($\gamma(t)$) :

$$\gamma(t) = \frac{P_{tr}}{\sigma_w^2} |h(t)|^2$$

Génération des fichiers de MCS

Nous avons utilisé les 7 schémas de modulation et codage (MCS) du standard WiMAX. Le tableau 4.3 présente les MCS considérés dans PolyMAX.

Les fichiers de MCS ont été générés par MATLAB à l'aide de l'outil **bertool**. Nous n'avons pas utilisé le codage turbo (TC) utilisé dans WiMAX, car il n'est pas supporté par

Tableau 4.3 Schémas de modulation et de codage (MCS) utilisés dans PolyMAX

MCS	Modulation	Taux de codage	Efficacité (bits/Symbole)
1	BPSK	1/2	0.5
2	QPSK	1/2	1
3	QPSK	3/4	1.5
4	16-QAM	1/2	2
5	16-QAM	3/4	3
6	64-QAM	2/3	4
7	64-QAM	3/4	4.5

bertool mais un codage convolutionnel classique (moins puissant que TC). Cependant, la norme fournit les résultats des différents MCS pour un canal AWGN. Nous avons alors utilisé ces données pour calibrer nos résultats. En effet, nous avons effectué une translation de nos courbes pour nous approcher le plus des performances stipulées dans le standard. De cette façon, les courbes que nous avons générées avec MATLAB sont très similaires aux résultats présentés dans le standard. La figure 4.3 présente le BER en fonction du SNR instantané avec un canal AWGN, pour les 7 MCS présentés dans le tableau 4.3 .

4.3.3 Implémentation du mécanisme DiffAMC

Dans le standard WiMAX, la décision concernant le MCS à utiliser est prise par la station de base (BS) dans le sens montant ou descendant du lien. C'est plus précisément l'ordonnanceur de la BS, qui s'en charge de spécifier le MCS à utiliser pour chaque intervalle d'ordonnancement. Le MCS et tous les paramètres de transmission nécessaires sont spécifiés dans le message **UL_MAP** pour le sens montant, et **DL_MAP** pour le sens descendant de la liaison. Ainsi, nous avons implémenté le mécanisme DiffAMC dans la classe d'ordonnancement de la station de base (**BSscheduler**). La figure 4.4 illustre le schéma fonctionnel de la méthode utilisée pour l'implémentation du mécanisme DiffAMC. Nous avons modifié la classe de la station de base (classe **BS_802.16**) pour que le fichier canal de chaque station enregistrée puisse être chargé (1). La station de base charge le contenu du fichier canal, pour chaque utilisateur, une seule fois au début de la simulation pour accélérer le temps d'accès aux données. Au début de chaque période d'ordonnancement (5 ms pour le WiMAX mobile), la base de données de SNR est mise à jour par la BS (2). Cette base de données contient toutes les stations enregistrées au réseaux avec leur mesure de SNR la plus récente. L'ordonnanceur consulte cette base de données pour connaître le SNR de chaque station (3).

Au niveau du OTcl, nous avons implémenté une nouvelle fonction appelée **set-diffAMC** pour communiquer les paramètres diffAMC de chaque station :

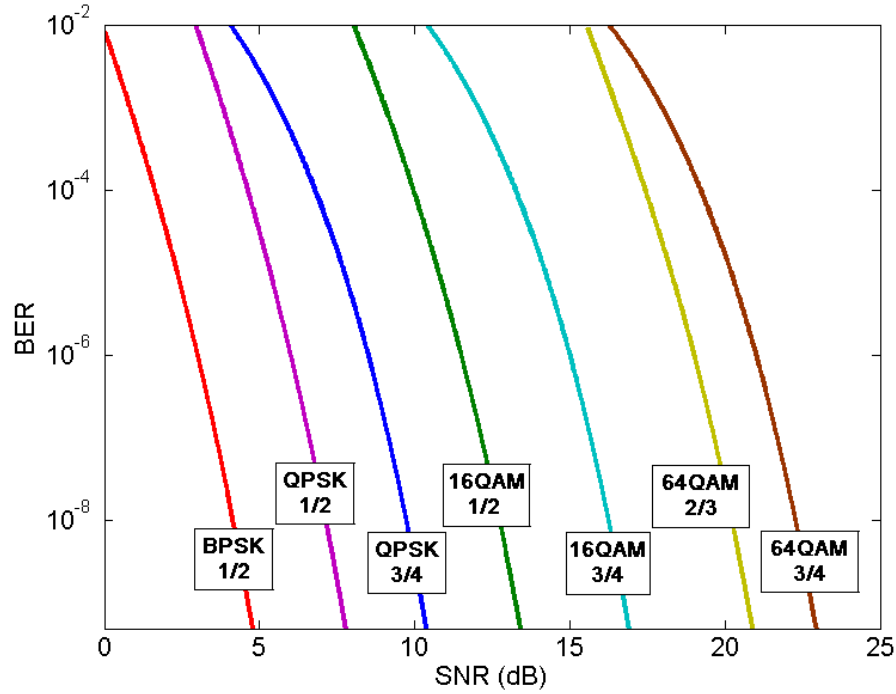


Figure 4.3 BER en fonction du SNR pour les 7 MCS de WiMAX utilisés.

```
<ObjetBS> set-diffAMC <NumStation><classeAMC><schémaAMC><paramètresIE>
```

Cette fonction est appelée via l'objet instancié de classe de la BS (<ObjetBS>). Elle a comme arguments :

- <Num Station> : Adresse de la station d'utilisateur SS;
- <classe AMC> : la classe AMC à utiliser (sous couche de différenciation par classe AMC);
- <schéma AMC> : le schéma AMC à utiliser (sous couche de différenciation par AMC intelligent);
- <paramètres IE> : Les paramètres de moteur intelligent (IE) nécessaire pour appliquer le schéma AMC choisi.

Au niveau de l'ordonnanceur, le mécanisme DiffAMC agit lors du choix du MCS. En se basant sur les paramètres DiffAMC de chaque utilisateur, le MCS est calculé et inscrit au niveau des messages **UL_MAP** et **DL_MAP** (5). Ces messages sont envoyés à la station d'utilisateur au début de chaque trame WiMAX (6).

Le mécanisme DiffAMC implémenté supporte deux modèles d'extrapolation; le modèle linéaire et le modèle en spline. Tous les paramètres de moteur intelligent sont supportés. La sous-couche de différenciation par classe AMC implémentée supporte 7 niveaux ($[10^{-2}..10^{-9}]$)

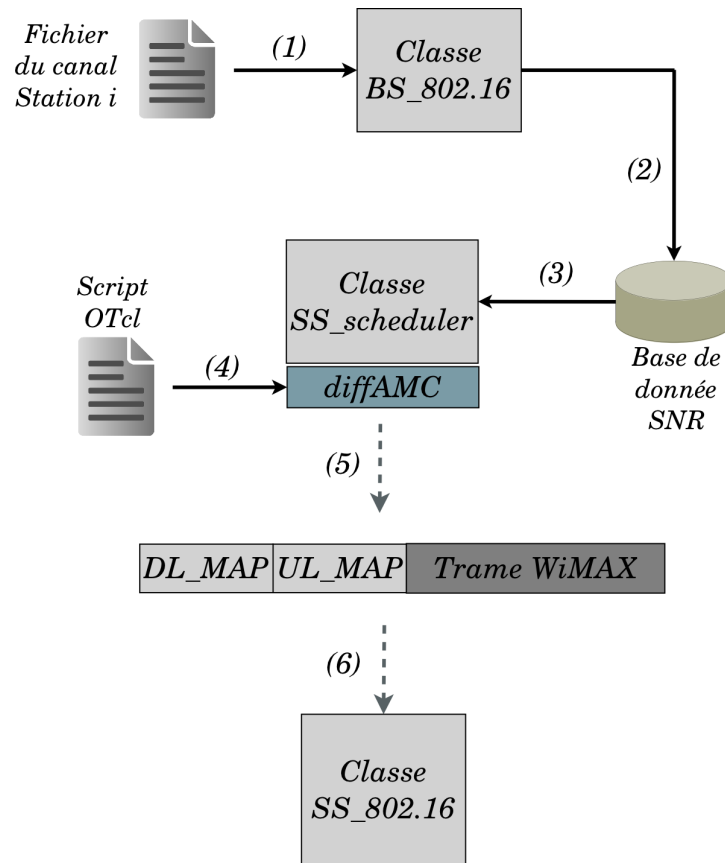


Figure 4.4 Schéma fonctionnel de la méthode utilisée pour l'implémentation du mécanisme DiffAMC.

avec leurs seuils de changement respectifs.

4.4 Analyse des résultats obtenus avec ns-2

Le simulateur ns-2 ne contient pas d'outils d'analyse des traces obtenues lors des simulations. Nous avons utilisé l'outil AWK, pour extraire les données des fichiers de sortie de ns-2. L'outil AWK est bien adapté pour traiter des fichiers de données ayant une structure par ligne, ce qui est notre cas. Avec l'intégration de PolyMAX, nos simulations fournissent en sortie la trace de ns-2 et le fichier de débogage de PolyMAX. La trace de ns-2 contient tous les événements relatifs aux paquets pendant la simulation. Le fichier de débogage de PolyMAX contient les événements relatifs à la couche MAC et physique de WiMAX.

La figure 4.5 illustre le traitement des fichiers de sortie de ns-2. Avec la trace de ns-2, nous pouvons extraire, via AWK, le taux d'erreur de paquets, le débit de la transmission, le délai et la gigue. Le fichier de débogage de PolyMAX nous permet d'extraire l'occupation de la bande passante. Cette mesure est très utile pour comparer l'impact des différents niveaux de DiffAMC sur la capacité du système.

Toutes les simulations sont répétées 35 fois avec différentes valeurs d'initialisation des générateurs aléatoires (*seeds*). Cela nous permet de calculer les intervalles de confiance à 95% des résultats obtenus.

4.5 Modèles de trafic

Le mécanisme DiffAMC vise à offrir plusieurs niveaux de fiabilités pour mieux satisfaire les besoins des différents types de trafic véhiculés dans les réseaux sans fil. Par conséquent, nous avons considéré dans nos simulations trois différents modèles de trafic :

- voix ;
- vidéo ;
- données.

Pour tous ces trafics, nous avons utilisé le protocole UDP (User Datagram Protocol). Ce protocole est utilisé par les trafics temps réel car il n'induit pas de délais supplémentaires, contrairement à TCP (Transmission Control Protocol) qui peut causer des délais de retransmission. En effet, pour un trafic temps réel (voix ou vidéo), un paquet retardé à cause d'une retransmission équivaut à un paquet perdu. Nous avons choisi UDP car nous nous intéressons au taux de perte de paquets dû aux erreurs de transmissions.

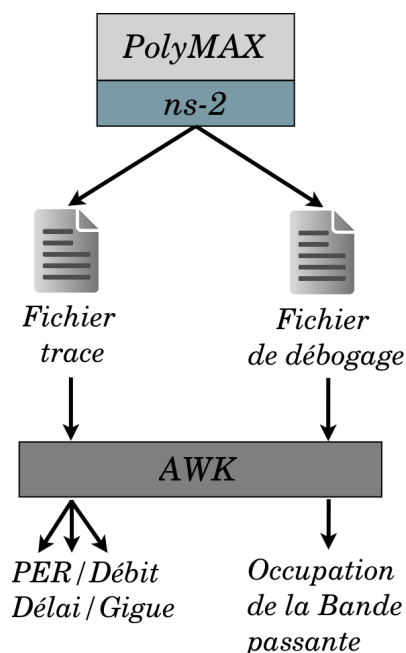


Figure 4.5 Analyse des fichiers de sortie de ns-2.

4.5.1 Trafic de voix

Le standard WiMAX mobile supporte les protocoles de voix sur IP (VoIP), et a prévu deux classes de QoS pour ce type de trafic, à savoir :

- La classe UGS(Unsolicited Grant Service), pour les sources de type E1/T1 et la VoIP sans suppression de période de silence ;
- La classe ertPS(Extended Real-Time Polling Service), pour les sources de voix avec suppression de période de silence.

Nous avons opté pour la classe UGS avec une source audio utilisant le standard G.711 [1]. Le taux de transmission du codec G.711 est de 64 kbps. La source audio que nous allons utiliser émet des paquets de taille fixe de 80 octets. L'intervalle d'arrivée des paquets est de 10 ms.

4.5.2 Trafic de vidéo

Afin d'obtenir un comportement réaliste d'une source vidéo, nous avons choisi d'utiliser dans nos simulations des traces de vidéos réelles pour générer le trafic vidéo. Les traces vidéos ont été réalisées et rendues publiques dans le cadre d'un projet à l'Université Technique de Berlin (Technical University Berlin) [27]. Nous avons utilisé la trace vidéo provenant du film *Jurassic Park* codé en MPEG-4 haute qualité. La trace vidéo est présentée sous forme de fichier texte contenant la taille des trames vidéo à envoyer. Nous avons implémenté une fonction

OTcl pour lire ce fichier trace et transmettre la taille des trames, à intervalles réguliers, à l'agent UDP de ns-2. La période entre deux trames successives est de 40 ms, et la durée totale de la trace est 60 minutes. Le tableau 4.4 résume les principales caractéristiques de la trace MPEG-4 utilisée.

Le trafic vidéo est véhiculé en utilisant la classe rtPS (Real-Time Polling Service) de WiMAX, conçue à cet effet.

4.5.3 Trafic de données

Le standard WiMAX prévoit deux classes pour le trafic de données :

- la classe BE(Best Effort) : pour les applications sans exigences de délai ou de gigue ;
- la classe nrtPS(non Real-Time Polling Service) : pour les applications qui exige un débit minimum.

Nous avons choisi d'utiliser la classe BE, car notre trafic ne nécessite pas un débit minimum à respecter. Le trafic de données a été modélisé par des sources générant un débit constant CBR (Constant Bit Rate). Le débit des sources CBR est fixé à 1.2 Mbps. Les sources émettent des paquets de tailles 1500 octets à un intervalle régulier de 10 ms.

4.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre notre plateforme de simulation. La méthodologie utilisée pour améliorer le simulateur ns-2 et le rendre plus adapté à nos besoins a été détaillée. Afin de supporter le standard WiMAX mobile, nous avons développé le module PolyMAX [15]. Par la suite, le support d'un canal sans fil a été implémenté dans le but d'évaluer le mécanisme DiffAMC. Dans le chapitre suivant, nous allons utiliser notre plateforme afin de valider les performances du mécanisme DiffAMC.

Tableau 4.4 Caractéristiques du trafic MPEG-4 utilisé (source : [27])

Statistiques	
Taux de compression(UV :MP4)	9.92
Durée de la vidéo (secondes)	60
Nombre de trames	89998
Taille moyenne de la trame(octets)	3831.49
Variance de la taille de la trame(octets)	5102945
CoV de la taille de la trame	0.5895
Taille minimale de la trame (octets)	72
Taille miximale de la trame (octets)	16745
Débit moyen (Mbit/sec)	0.7663
Débit maximum (Mbit/sec)	3.3494
Rapport débit max/débit moyen	4.37

CHAPITRE 5

SIMULATIONS ET ANALYSE DES RÉSULTATS

Ce chapitre présente les résultats des simulations que nous avons réalisées. Après une brève introduction, la section 5.2 décrit le plan d'expérience que nous avons utilisé. Par la suite, les résultats obtenus sont exposés et commentés dans la section 5.3. Finalement, les résultats sont analysés dans la section 5.4.

5.1 Introduction

Dans le chapitre 3, DiffAMC a été testé dans un environnement de simulation simple. Le but était d'évaluer uniquement le potentiel de DiffAMC sans aucune interaction avec un standard de communications. Dans ce chapitre, nous allons mettre à l'épreuve le mécanisme DiffAMC dans un environnement réaliste à l'aide de la plateforme de simulation développée dans le chapitre 4. L'impact du mécanisme DiffAMC a été évalué en terme de :

- Taux de perte de paquets ;
- Taux d'occupation de la bande passante.

L'analyse des résultats obtenus nous guidera dans l'identification des niveaux DiffAMC les plus performants dans le cadre de notre simulation. En nous basant sur ces données, nous allons proposer dans la section 5.4 trois classes de qualité de fiabilité (QoR). Ces classes de QoR peuvent être utilisées en combinaison avec les classes de QoS du WiMAX, et éventuellement avec les classes DiffServ.

5.2 Plan d'expérience

5.2.1 Scénario

Dans nos simulations, nous avons utilisé une station mobile (SS) connectée à une station de base (BS). La BS est située au milieu d'une zone carrée, de 1 km^2 de superficie. Elle est reliée à un routeur via une connexion de 100 Mbps, et ayant un délai de 1 ms. La SS qui évolue dans cette zone envoie du trafic à destination du routeur.

Conformément à la procédure d'entrée au réseau WiMAX, la station mobile scanne le canal descendant au début de chaque simulation. Elle synchronise les paramètres initiaux de transmission dans les sens descendant et montant. Ensuite, une demande d'enregistrement au réseau est envoyée par la station mobile. Une fois que l'enregistrement est accepté par

la station de base, la station mobile demande les connexions de bases nécessaires pour les données de gestion. Par la suite, la station va envoyer une demande de nouvelle connexion, associée à un flux de service, avec les paramètres de la qualité de service correspondants au trafic qui va être véhiculé. Le trafic de voix est associé à la classe UGS (Unsolicited Grant Service), celui de vidéo à la classe rtPS (Real-Time Polling Service), et celui de données à la classe BE (Best Effort). La station mobile transmet du trafic pendant 60 secondes. La simulation se termine 10 secondes plus tard pour s'assurer que tous les paquets sont traités. Nous avons considéré 32 niveaux de différenciation DiffAMC, générés par la combinaison de 8 classes AMC et de 4 schémas d'AMC intelligent. Les 8 classes AMC ont des BER_{max} allant de 10^{-2} à 10^{-9} . Les classes AMC utilisées dans la simulation sont illustrées dans le tableau 5.1, et les schémas d'AMC intelligent sont dans le tableau 5.2.

Les paramètres des schémas de l'AMC intelligent ont été choisis pour couvrir le spectre des performances. En effet, nous avons d'un coté le schéma 1 qui n'offre aucune protection, et de l'autre côté, le schéma 4 qui offre une protection très élevée. Entre les schémas 1 et 4, nous avons mis en place 2 schémas offrant des performances à mi-chemin. Cette méthodologie nous permet de mieux juger de l'impact positif et négatif des schémas sur les performances. Il est à noter que l'engin stochastique (SE) est désactivé dans les schémas que nous avons choisis. En effet, comme nous avons vu dans le chapitre 3, nous avons pu vérifier que le SE améliore uniquement les performances lorsque le taux de mise à jour de l'état du canal est très faible (strictement inférieur à 3). Or dans nos simulations, nous avons choisi d'utiliser un taux de 5. Ainsi, dans notre cas de figure, l'utilisation du SE n'a aucun impact positif sur les performances.

Tableau 5.1 Les Classes de différenciation AMC.

Classe AMC	BER_{max}
1	10^{-2}
2	10^{-3}
3	10^{-4}
4	10^{-5}
5	10^{-6}
6	10^{-7}
7	10^{-8}
8	10^{-9}

Tableau 5.2 Schémas de différenciation par AMC intelligent.

Paramètres	Schéma 1	Schéma 2	Schéma 3	Schéma 4
EE	inactif	actif	actif	actif
Modèle d'extrapolation	-	Linéaire	Linéaire	Spline
Offset	-	0.75	0.5	0.5
Portée d'extrapolation	-	0.1	0.5	0.75
SE	inactif	inactif	inactif	inactif

5.2.2 Paramètres de la simulation

Paramètres du réseau WiMAX

Nous avons utilisé un réseau WiMAX mobile avec une bande passante de 20 MHz. La longueur de la trame WiMAX est de 5 ms, divisée en deux sous-trames, une pour le trafic montant et une pour le trafic descendant. Nous avons alloué 20% de la bande passante pour la sous-trame du trafic descendant et le reste pour la sous-trame du trafic montant. La zone de garde entre les deux sous-trames est de 10 slots physiques (PS, Physical Slot). L'interface OFDM est utilisée avec un préfixe cyclique de 1/16.

Paramètres de QoS

Les classes de qualité de service utilisées (UGS, rtPS, BE) sont configurées en fonction du trafic véhiculé. Chaque classe de QoS du WiMAX est adaptée à un certain type de trafic (vidéo, voix, web, ftp, etc.). De plus, les classes peuvent être configurées afin de mieux convenir aux spécificités du trafic (débit maximum, débit minimum, priorité, etc.). La classe UGS est configurée afin d'assurer un débit de 80 Kbps. L'intervalle entre 2 permissions de transmission est de 10 ms. La classe rtPS assure un débit maximum de 1 Mbps et minimum de 128 Kbps. L'intervalle entre 2 permissions pour transmettre une demande de bande passante est de 30 ms. La classe BE ne garantit aucune qualité de service. Les transmissions de données sont précédées par des demandes de bande passante. Ces demandes sont organisées selon une procédure de backoff exponentielle tronquée. La fenêtre de backoff appliquée varie entre 2 et 16.

Canal sans fil

Nous voulons que les variations à petite échelle du SNR soient le plus réalistes que possible. C'est pourquoi le canal sans fil que nous avons choisi est le canal 3GPP-Tux (Typical Urban) [6]. Ce modèle a été développé par le 3GPP (3rd Generation Partnership Project), qui est un groupe de collaboration entre plusieurs associations de télécommunications. Le canal 3GPP-

Tux est basé sur le modèle COST-259 [21]. Il est utilisé pour la conception de système de télécommunications de nouvelle génération. Ce canal considère 20 chemins et utilise un spectre Doppler de Jakes. La puissance moyenne des chemins suit la forme exponentielle utilisée pour le modèle COST-259[6]. Les étalements des délais sont semblables à ceux utilisés dans le modèle COST-259 pour des macros-cellules de tailles typiques [6].

Le temps de cohérence du canal est de 25 ms. Cela correspond à un mobile se déplaçant à 62 km/h et utilisant un système de 4^e génération à 700 MHz. Sachant que l'intervalle de mise à jour du WiMAX mobile est 5 ms, le taux de mise à jour de l'état du canal (T_c/TTI) est égal à 5. Dans le sens montant de la transmission, c'est la station de base (le récepteur) qui mesure le SNR. Par la suite, la station de base indique à la station mobile via le message UL_MAP le schéma de modulation et de codage le plus approprié dans la prochaine trame. La mesure du SNR s'effectue au début de chaque intervalle d'ordonnancement, qui coïncide avec la durée de la trame dans WiMAX. Le script ns-2 contenant le scénario et tous les paramètres détaillés de la simulation est présenté dans l'Annexe A.

5.3 Résultats des simulations

Nous allons présenter dans cette section les résultats des simulations. Chaque niveau de différenciation (32 niveaux) est combiné avec les trois types de trafic. Les trafics que nous avons utilisés (voix, vidéo et données) sont présentés dans la section 4.5 du chapitre 4. Pour chaque combinaison, la simulation est répétée 35 fois avec des réalisations différentes du canal. Les niveaux de différenciation seront notés comme suit :

$$DiffAMC_{(schéma,classe)}$$

Ainsi, $DiffAMC_{(4,8)}$ indique le niveau utilisant le schéma d'AMC intelligent 4 et la classe AMC numéro 8. Les niveaux de différenciation sont aussi numérotés de 1 à 32. Par exemple, le niveau numéro 1 est le $DiffAMC_{(1,1)}$, et le niveau numéro 9 est le $DiffAMC_{(2,1)}$. Dans les figures, les niveaux sont groupés par classe AMC. Dans chaque groupement, nous avons représenté les 4 schémas d'AMC intelligent.

5.3.1 Taux de perte de paquets

Le taux de perte de paquets est mesuré au niveau de la couche application du routeur connecté à la station de base. Les résultats sont extraits des fichiers trace générés par ns-2. Nous nous intéressons dans notre étude à l'impact de l'utilisation de DiffAMC sur le PER dû aux erreurs de transmission. Par conséquent, le taux de perte est calculé sans l'utilisation d'un mécanisme de retransmission.

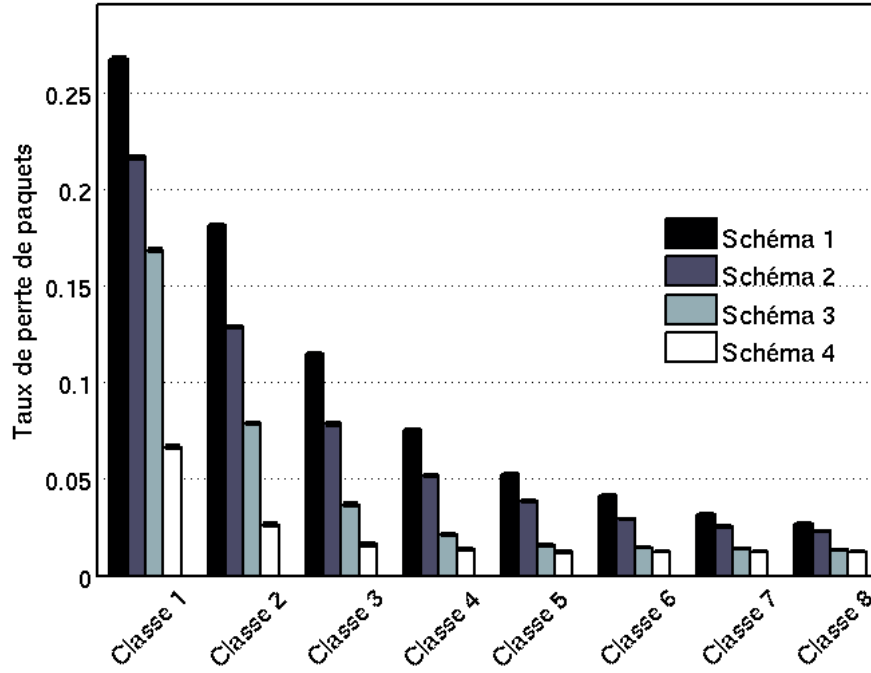


Figure 5.1 Taux de perte de paquets pour le trafic de voix.

La figure 5.1 présente les taux de perte de paquets pour le trafic de voix. Le taux de perte le plus élevé est réalisé par le niveau $DiffAMC_{(1,1)}$, avec un PER de 0,267. Le meilleur PER est réalisé par le niveau $DiffAMC_{(4,8)}$, avec 0,012. Au sein de chaque classe AMC, nous pouvons remarquer que le PER est décroissant en fonction des schémas (du schéma 1 au schéma 4). En moyenne, l'utilisation du schéma 2 génère une diminution de 25%, par rapport au schéma 1. L'amélioration moyenne du PER du schéma 3 par rapport au schéma 2 est de 46%, et celle du schéma 4 est de 34%. Tous les schémas ont une tendance exponentielle décroissante en fonction des classes AMC. Les schémas 3 et 4, ont un comportement asymptotique, à partir de la classe 7 et 5, respectivement.

La figure 5.2 présente les taux de perte de paquets pour le trafic de vidéo (MPEG-4). Le taux de perte le plus élevé correspond au niveau $DiffAMC_{(1,1)}$, avec une PER de 0,44. Cette valeur très élevée est due à la taille moyenne des paquets vidéo (3831 octets) qui sont inadaptés à la valeur de BER_{max} de la classe 1. Par contre, et dans les mêmes conditions, nous remarquons que le niveau $DiffAMC_{(4,1)}$ arrive à générer un PER de 0.19. Le meilleur PER est réalisé par le niveau $DiffAMC_{(4,8)}$, avec 0,023. Au niveau de chaque classe AMC, le PER est décroissant en fonction des schémas. Le gain moyen du schéma 2 par rapport au schéma 1 (AMC classique) est de 22%. Le schéma 3 améliore de 28.2 % par rapport au schéma 2. Le schéma 4 arrive à diminuer le PER de 46% par rapport au schéma 3, et par 70%

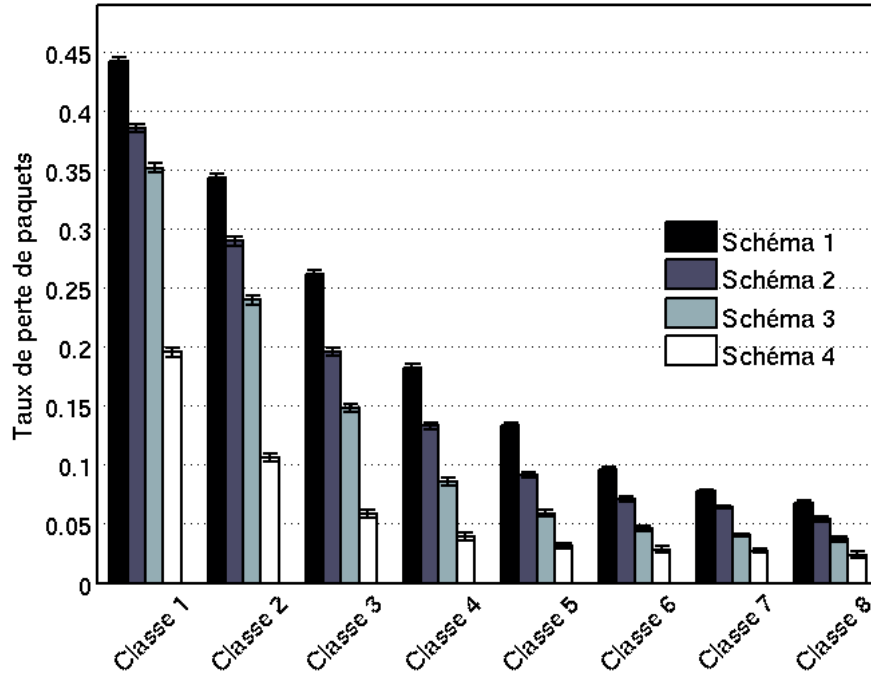


Figure 5.2 Taux de perte de paquets pour le trafic de vidéo.

par rapport au schéma 1. De même que pour le trafic de voix, tous les schémas ont une allure exponentielle décroissante en fonction des classes AMC. Le schéma 4, a un comportement asymptotique, à partir de la classe 7.

La figure 5.3 présente les taux de perte de paquets pour le trafic de données. De même que pour le trafic de vidéo, le PER le plus élevé résulte de l'utilisation du niveau $DiffAMC_{(1,1)}$, avec un taux de perte de 0.43. Le PER le moins élevé est généré par le niveau $DiffAMC_{(4,8)}$, avec une valeur de 0.016. Similairement aux deux autres types de trafic, le PER est décroissant en fonction des schémas AMC. Le schéma 2 de l'AMC intelligent améliore le PER de 26% , en moyenne, par rapport au schéma 1. Le schéma 3 diminue encore le PER de 40% par rapport au schéma 2. Le schéma 4 arrive à baisser le taux de perte de 39.5% par rapport au schéma 3, ce qui se traduit par une amélioration totale de 74% par rapport au schéma 1. Tous les schémas d'AMC intelligent décroissent exponentiellement, en fonction des classes AMC. Les schémas 3 et 4 ont un comportement asymptotique à partir de la classe 7 et 5, respectivement.

Nous avons pu vérifier dans cette sous section les différences en terme de PER résultants de l'utilisation des différents niveaux DiffAMC. Nous avons aussi pu constater que quelle que soit la classe AMC, le PER est toujours décroissant du schéma 1 vers le schéma 4. Nous allons voir dans ce qui suit l'impact des niveaux DiffAMC sur l'utilisation de la bande passante.

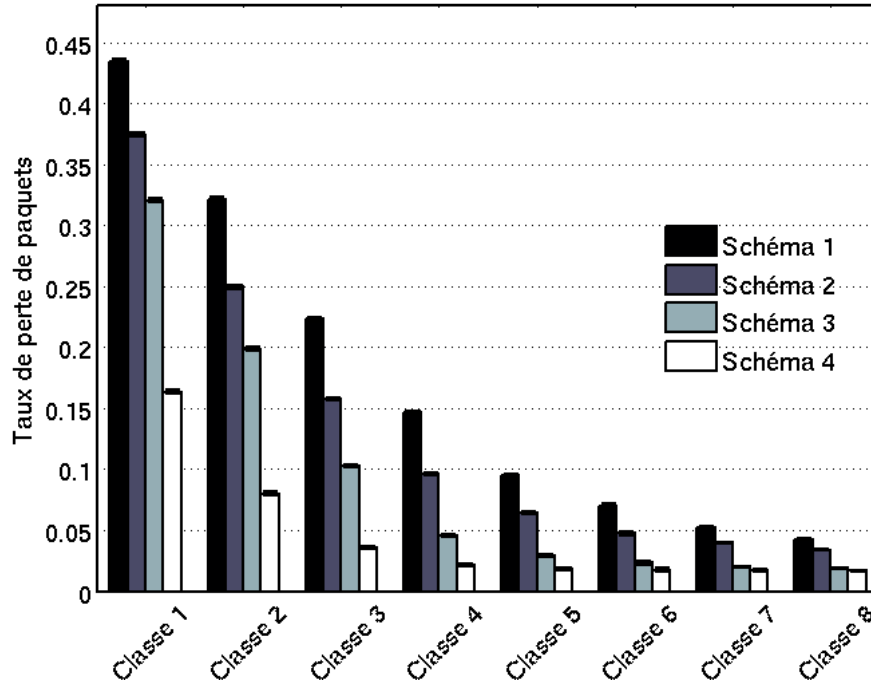


Figure 5.3 Taux de perte de paquets pour le trafic de données.

5.3.2 Taux d'occupation de la bande passante

Le taux d'occupation de la bande passante est mesuré par l'ordonnanceur de la station de base. Les résultats sont extraits des fichiers de débogage de PolyMAX. Le taux d'occupation de la bande passante représente le nombre de symboles OFDM utilisés par le flux transmis, par rapport au nombre de symboles disponibles dans la sous trame montante. Plus le taux d'occupation de la bande passante est élevé, et plus le nombre de flux qui peuvent être acceptés par le système, diminue. Par conséquent, un taux d'occupation faible est toujours préférable, car cela augmente la capacité du système de communication. Autrement dit, un taux d'occupation élevé contribue à augmenter le coût, et *vice versa*.

Les niveaux de DiffAMC sont présentés dans cette sous section sous forme de 4 courbes. Chaque courbe représente 8 niveaux ayant le même schéma AMC, en fonction des classes AMC. La figure 5.4 présente le taux d'occupation de la bande passante pour le trafic de voix. Le taux d'occupation pour le trafic de voix varie entre 0.39% et 0.67%, généré respectivement par les niveaux $DiffAMC_{(1,1)}$ et $DiffAMC_{(4,8)}$. Nous remarquons que toutes les courbes sont linéairement croissantes en fonction des classes AMC. La courbe des niveaux DiffAMC utilisant le schéma 1 (AMC classique) a une pente de 0.017, et un taux d'occupation moyen de 0.45%. La courbe présentant le schéma 2 a une pente de 0.018, et un taux d'occupation moyen de 0.47%. L'utilisation du schéma 2 se traduit par une augmentation du

taux d'occupation de la bande passante de 4.61% en moyenne. La courbe des niveaux utilisant le schéma d'AMC intelligent 3 a une pente de 0.019, et un taux d'occupation de 0.5%. Ainsi, un niveau DiffAMC utilisant le schéma 3 utilise en moyenne 7% de plus de bande passante qu'un niveau utilisant le schéma 2, et 12% de plus qu'un niveau de schéma 1. La courbe des niveaux utilisant un schéma 4 a une pente croissante de 0.021, et un taux d'occupation moyen de 0.59%. Les niveaux DiffAMC utilisant le schéma 4 consomment, en moyenne, 18.6% de plus de bande passante que les niveaux utilisant le schéma 3, et 27% de plus que les niveaux utilisant schéma 1.

La figure 5.5 illustre le taux d'occupation de la bande passante pour le trafic de vidéo. Le taux d'occupation du trafic de vidéo varie entre 1.47% ($DiffAMC_{(1,1)}$) et 3.28% ($DiffAMC_{(4,8)}$). De même que pour les courbes du trafic de voix, toutes les courbes sont linéairement croissantes en fonction des classes AMC. La courbe des niveaux DiffAMC utilisant le schéma 1 a une pente de 0.116, et un taux d'occupation moyen de 1.88%. La courbe représentant les niveaux utilisant le schéma 2 a une pente croissante de 0.126. Le taux d'occupation de la bande passante est de 2%, ce qui représente une augmentation de 6.8% en moyenne par rapport au schéma 1. La courbe du schéma 3 a une pente de 0.129 et un taux d'occupation de 8.81%. L'utilisation de la bande passante est en moyenne 8.6% et 16% plus élevée que le schéma 2 le schéma 1, respectivement. La courbe présentant les niveaux DiffAMC utilisant le schéma 4 a un coefficient directeur de 0.164. Le taux d'occupation de la bande passante est en moyenne le plus élevé avec 2.73%. Cela représente une augmentation de plus de 25% par rapport aux niveaux de schéma 3, et 36% par rapport à ceux du schéma 1.

Le taux d'occupation de la bande passante pour le trafic de données est présenté dans la figure 5.6. Le taux d'occupation varie entre les valeurs 1.95 et 3.66%, générées par les niveaux $DiffAMC_{(1,1)}$ et $DiffAMC_{(4,8)}$. La courbe des niveaux DiffAMC utilisant le schéma 1 a une pente de 0.066 et un taux d'occupation moyen de 2.15%. La courbe présentant le schéma 2 a une pente de 0.077 et un taux d'occupation moyen de 2.26%. L'utilisation du schéma 2 engendre une augmentation du taux d'occupation de la bande passante de 5% en moyenne. La courbe des niveaux utilisant le schéma 3 a une pente de 0.10 et un taux d'occupation de 2.49%. Par conséquent, les niveaux DiffAMC utilisant le schéma 3 utilisent en moyenne 10.57% de bande passante en plus que les niveaux du schéma 2, et 16% de plus que les niveaux du schéma 1. La courbe présentant les niveaux DiffAMC utilisant le schéma 4 a une pente de 0.128. Le taux d'occupation moyen est de 3.2%, ce qui représente une augmentation de 28% par rapport aux niveaux du schéma 3, et 41.5% par rapport à ceux du schéma 4.

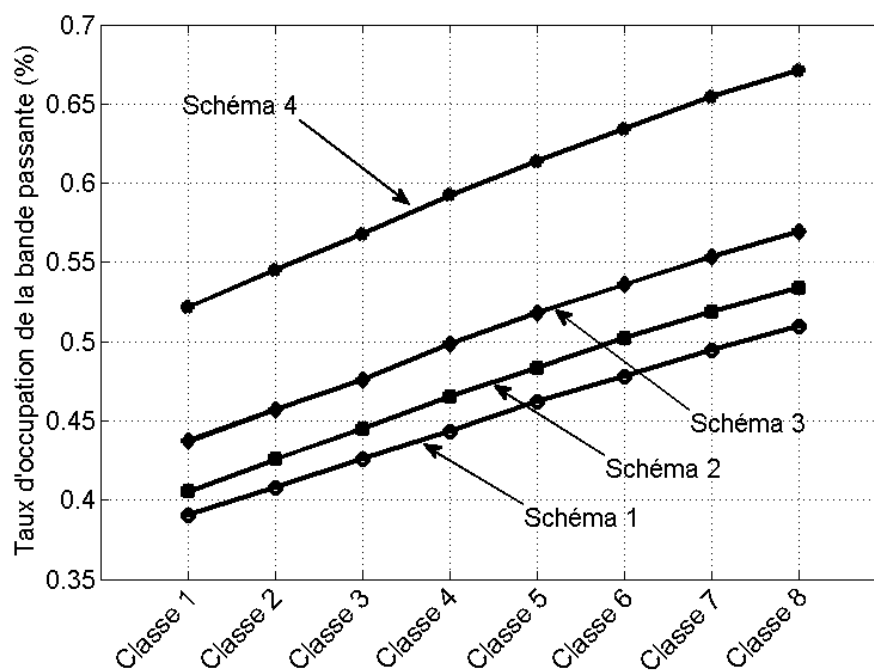


Figure 5.4 Taux d'occupation de la bande passante pour le trafic de voix.

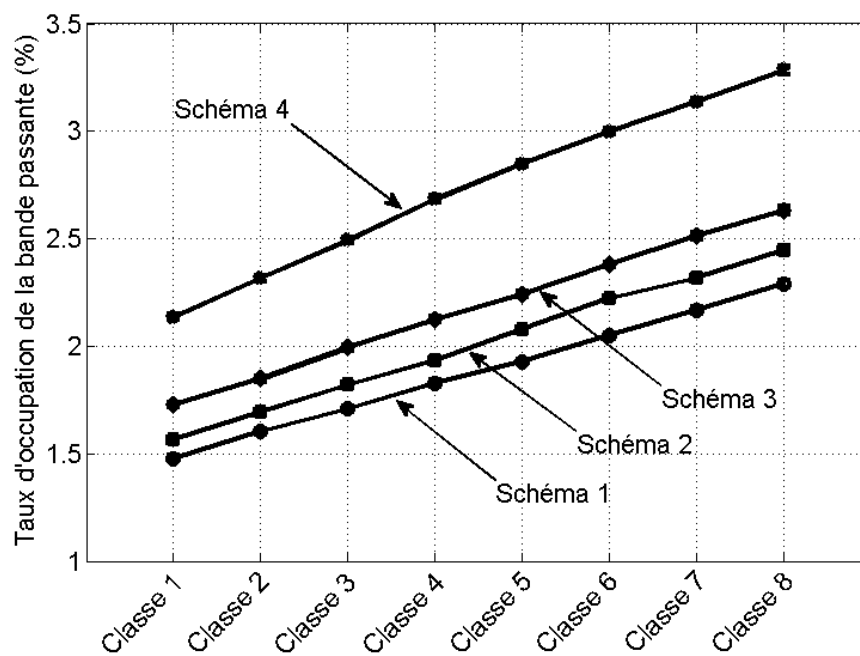


Figure 5.5 Taux d'occupation de la bande passante pour le trafic de vidéo.

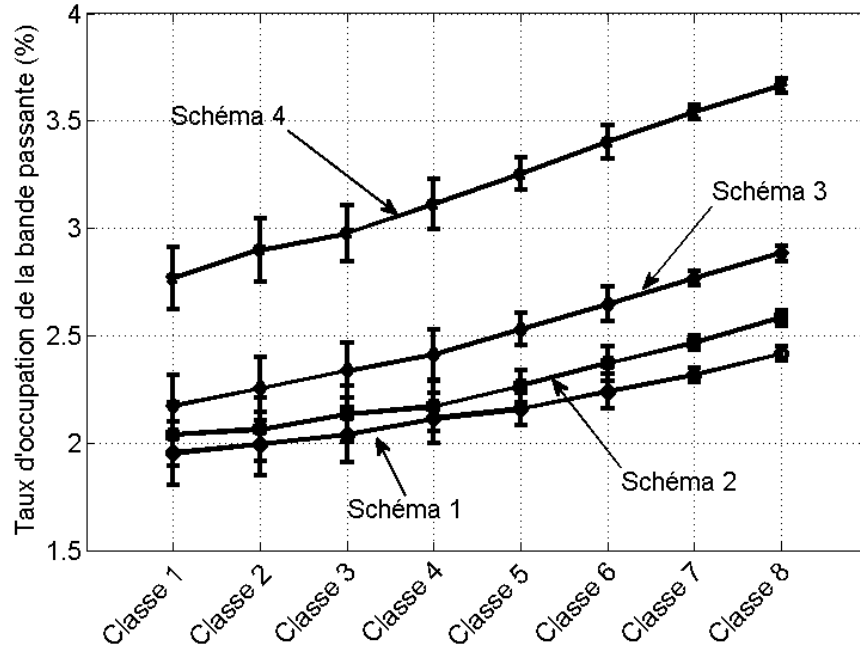


Figure 5.6 Taux d'occupation de la bande passante pour le trafic de données.

5.4 Analyse et propositions

5.4.1 Analyse des résultats

En se basant sur les résultats de taux de perte de paquets et du taux d'occupation de la bande passante, présentés dans les sections 5.3.1 et 5.3.2, nous avons analysé l'efficacité de chaque niveau en comparaison avec les autres. Nous avons appliqué un processus de raffinement nous permettant de trouver les points Pareto et les dominances. Ainsi, tous les niveaux inefficaces sont éliminés. Nous considérons qu'un niveau i est inefficace s'il existe un autre niveau j dont le PER et le taux d'occupation sont conjointement inférieurs. Dans un tel cas, le niveau j est beaucoup plus avantageux à utiliser (j domine i). La première étape consiste à éliminer tous les niveaux jugés inefficaces. Si 2 niveaux génèrent le même PER (à 3 décimaux près), nous gardons le niveau DiffAMC ayant le taux d'occupation le moins élevé. De l'autre côté, si deux niveaux ont le même taux d'occupation, c'est le niveau générant le PER le plus faible qui est conservé. La deuxième étape consiste à trier tous les niveaux par PER décroissant. Dans la troisième, et dernière étape, les niveaux de la partie asymptotique sont éliminés. Ainsi, tous les niveaux DiffAMC utilisant le même schéma, et qui n'améliore pas significativement le PER (moins de 1%) sont éliminés. En effet, ces niveaux n'améliorent pas le PER, mais le taux d'occupation continue d'augmenter de façon linéaire (voir section 5.3.2).

La figure 5.7 illustre les résultats obtenus par les 32 niveaux de différenciation DiffAMC pour le trafic de voix. Le tableau 5.3 présente les 11 niveaux DiffAMC (sur un total de 32) que nous avons retenus pour ce trafic. Le niveau numéro 5 (en gras) est la combinaison correspondante au niveau utilisé par le WiMAX ; avec un AMC classique et un BER_{max} de 10^{-6} . Les 11 niveaux retenus ont un PER allant de 0.267 à 0.012, et un taux d'occupation allant de 0.39% à 0.634%. Nous remarquons que la classe 8 ($BER_{max} = 10^{-9}$) n'est pas utilisée. En effet, la taille moyenne des paquets de voix ne nécessite pas un BER_{max} aussi élevé. Tous les niveaux DiffAMC de cette classe ont été éliminés car ils n'améliorent pas le PER de façon significative, mais augmentent le taux d'occupation. Il est aussi à noter que les classes 6 et 7 utilisées dans les niveaux 22, 23 et 30 n'améliorent que très légèrement le PER. Si l'étape d'élimination des doublons était effectuée à 2 décimaux près, ils seraient aussi éliminés. Le schéma d'AMC intelligent numéro 2, n'est pas utilisé. En effet, pour le trafic de voix, les niveaux DiffAMC utilisant le schéma 2 ont tendance à être déclassés par les classes basses du schéma 3, et par les classes hautes du schéma 1. Avec approximativement le même PER, ces classes offrent en général un taux d'occupation de la bande passante moins élevé.

La figure 5.8 illustre les résultats obtenus par les 32 niveaux de différenciation DiffAMC pour le trafic de vidéo. Le tableau 5.4 présente les 14 niveaux DiffAMC que nous avons retenus. Les 14 niveaux DiffAMC génèrent un PER allant de 0.343 à 0.023, et un taux d'occupation de la bande passante de 1.6 à 3.2%. Tous les schémas AMC intelligents sont utilisés. Nous remarquons que les niveaux utilisant les schémas 1 et 2 sont généralement combinés à des classes basses (≤ 5). Les schémas 3 et 4 retenus sont pour la plupart des combinaisons avec des classes hautes (≥ 5). Le niveau de fiabilité offert par le WiMAX (numéro 5), génère un PER de 0.13 et un taux d'occupation de 1.927%. Avec DiffAMC, ce niveau peut être très avantageusement échangé avec le niveau $DiffAMC_{(2,5)}$ (niveau 13). En effet, cela nous fait gagner plus de 31% en terme de PER, et en ne concédant que 7% de taux d'occupation.

La figure 5.9 illustre les résultats obtenus par les 32 niveaux de différenciation DiffAMC pour le trafic de données. Le tableau 5.5 présente les 14 niveaux DiffAMC que nous avons retenus pour ce trafic. Ces niveaux génèrent un PER allant de 0.321 à 0.016, et un taux d'occupation de la bande passante de 1.99 à 3.53%. Tous les schémas AMC intelligents de DiffAMC sont utilisés dans les niveaux retenus. Les schémas AMC 3 et 4 sont uniquement utilisés avec des classes hautes. De la même façon que pour le trafic vidéo, le niveau de fiabilité du standard WiMAX (Niveau 5) correspondant au niveau $DiffAMC_{(1,5)}$ peut être remplacé par le niveau $DiffAMC_{(2,5)}$. Ce changement nous fait gagner 32% en terme de PER, en concédant uniquement 4% de bande passante en plus.

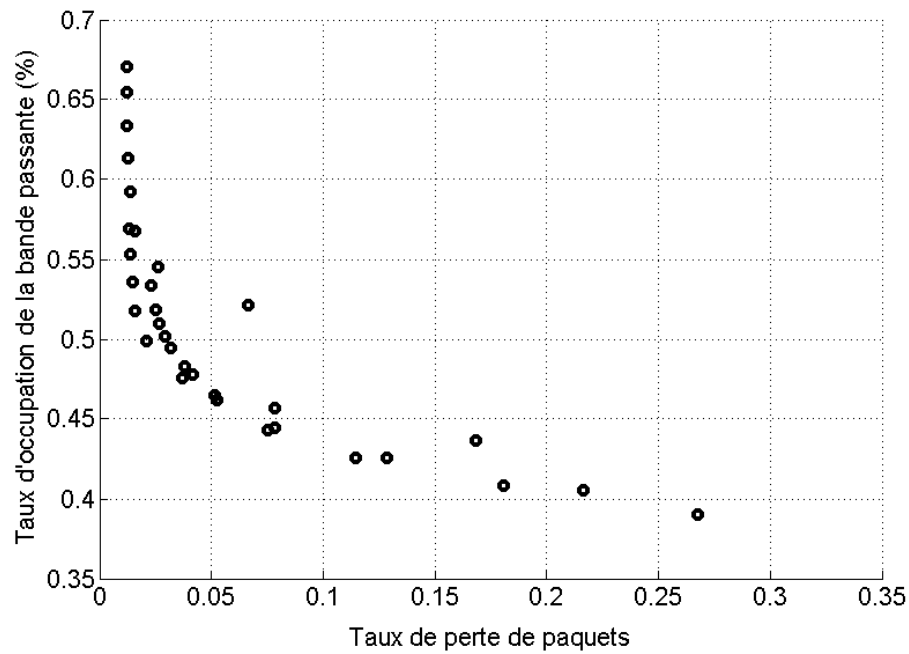


Figure 5.7 Taux d'occupation de la bande passante en fonction du taux de perte de paquets pour le trafic de voix.

Tableau 5.3 Schémas de différenciation DiffAMC pour le trafic de voix après raffinage.

Numéro du niveau	Niveau DiffAMC (Schéma, Classe)	Taux de perte de paquets	Taux d'occupation de BW (%)
1	(1,1)	0.2674	0.3902
2	(1,2)	0.1809	0.4080
3	(1,3)	0.1145	0.4258
4	(1,4)	0.0750	0.4432
5	(1,5)	0.0527	0.4621
19	(3,3)	0.0367	0.4759
20	(3,4)	0.0212	0.4986
21	(3,5)	0.0158	0.5181
22	(3,6)	0.0145	0.5356
23	(3,7)	0.0139	0.5536
30	(4,6)	0.0124	0.6340

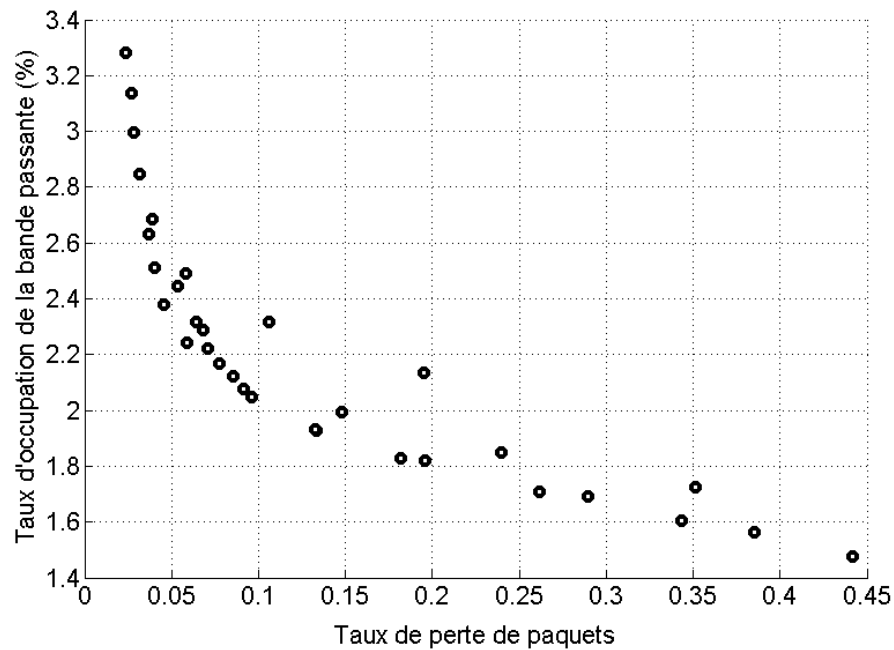


Figure 5.8 Taux d'occupation de la bande passante en fonction du taux de perte de paquets pour le trafic de vidéo.

Tableau 5.4 Schémas de différenciation DiffAMC pour le trafic vidéo après raffinage.

Numéro du niveau	Niveau DiffAMC (Schéma, Classe)	Taux de perte de paquets	Taux d'occupation de BW (%)
2	(1,2)	0.3432	1.6032
10	(2,2)	0.2895	1.6919
3	(1,3)	0.2613	1.7072
11	(2,3)	0.1956	1.8186
4	(1,4)	0.1819	1.8280
5	(1,5)	0.1330	1.9276
13	(2,5)	0.0913	2.0778
20	(3,4)	0.0853	2.1243
14	(2,6)	0.0707	2.2218
21	(3,5)	0.0589	2.2413
23	(3,7)	0.0403	2.5116
29	(4,5)	0.0317	2.8485
31	(4,7)	0.0268	3.1371
32	(4,8)	0.0238	3.2833

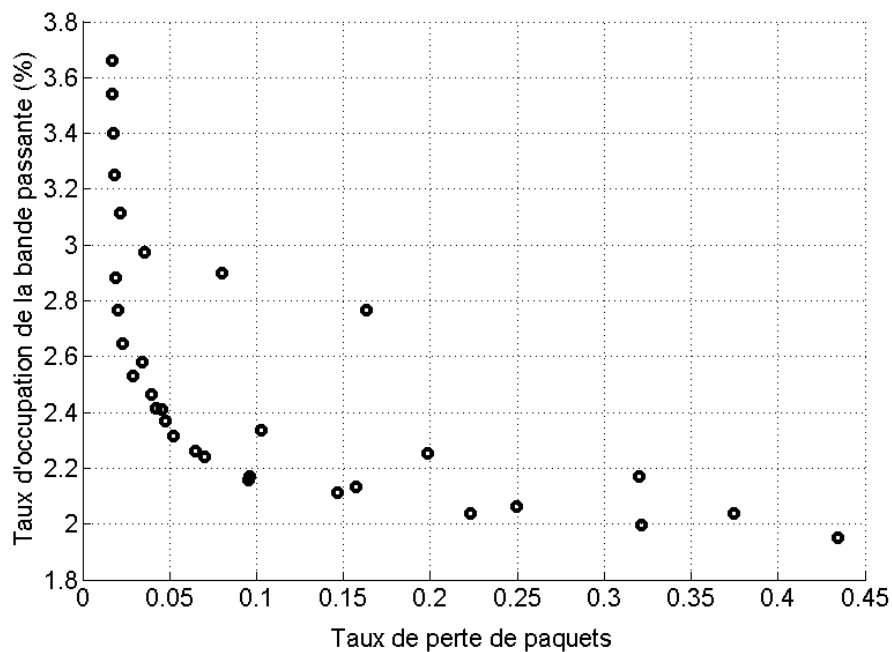


Figure 5.9 Taux d'occupation de la bande passante en fonction du taux de perte de paquets pour le trafic de données.

Tableau 5.5 Schémas de différenciation DiffAMC pour le trafic de données après raffinage.

Numéro du niveau	Niveau DiffAMC (Schéma, Classe)	Taux de perte de paquets	Taux d'occupation de BW (%)
2	(1,2)	0.3215	1.9951
3	(1,3)	0.2229	2.0381
4	(1,4)	0.1465	2.1138
5	(1,5)	0.0952	2.1587
13	(2,5)	0.0647	2.2634
7	(1,7)	0.0524	2.3163
8	(1,8)	0.0423	2.4153
15	(2,7)	0.0398	2.4665
21	(3,5)	0.0290	2.5293
22	(3,6)	0.0232	2.6462
23	(3,7)	0.0201	2.7686
24	(3,8)	0.0187	2.8815
30	(4,6)	0.0173	3.4012
31	(4,7)	0.0169	3.5392

5.4.2 Proposition de déploiement

Le mécanisme DiffAMC peut être intégré dans n'importe quel standard utilisant l'AMC. Aucune modification du standard n'est nécessaire car DiffAMC utilise le schéma de retour d'information classique de l'AMC. Le support de DiffAMC par un standard existant nécessite uniquement une mise à jour logicielle de l'ordonnanceur et de la base de données de la station de base. En effet, l'ordonnanceur doit choisir le schéma de modulation et de codage en fonction du niveau DiffAMC. Ce choix est basé sur les données retournées par la station mobile pour le sens montant, et localement pour le sens descendant. La sous-couche de différenciation par classe AMC, nécessite un espace de stockage supplémentaire (quelques kilo-octets) pour les seuils de changement par classe AMC. La sous-couche de différenciation par AMC intelligent a besoin d'un champ supplémentaire dans la base de données de la station de base, contenant les SNR précédents de chaque station. Aucune modification n'est nécessaire dans les terminaux mobiles. Du point de vue matériel, aucune modification n'est requise, que ce soit au niveau de la station de base ou pour les terminaux mobiles.

En cas de déploiement de DiffAMC, un opérateur peut proposer par exemple 3 classes de fiabilité (QoR, Quality of Reliability) à ses utilisateurs. Ces classes peuvent être éventuellement combinées avec les niveaux de différenciation DiffServ (EF, AF, BE) de la couche IP [50]. En vue des résultats obtenus par simulation, nous pouvons proposer pour chaque type de flux trois niveaux de protection DiffAMC :

- normale ;
- élevée ;
- maximale.

La protection normale offre un niveau de fiabilité acceptable. Nous avons choisi un niveau de fiabilité assurant un PER inférieur à 10%, quel que soit le type de trafic. La protection élevée peut être utilisé pour les utilisateurs désirant bénéficier d'une fiabilité accrue. Cette dernière garantit un PER inférieur à 6%. Finalement, la protection maximale assurant un PER inférieur à 3% peut être proposée aux utilisateurs du réseau dont le métier exige une disponibilité très élevée, ou encore aux utilisateurs très exigeants. Il est aussi à noter que toutes ces valeurs sont obtenues avec un modèle de canal sans fil très exigeant. De meilleures conditions vont générer des taux de perte de paquets moins élevés. Le tableau 5.6 présente les niveaux DiffAMC qui peuvent être assignés à chaque niveau de protection.

5.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les résultats de simulations obtenus par le mécanisme DiffAMC. Nous avons pu vérifier le potentiel de DiffAMC en terme de différenciation du

Tableau 5.6 Les niveaux de fiabilité proposés en fonction des niveaux DiffAMC.

Type de trafic	Protection normale	Protection élevée	Protection maximale
Voix	$DiffAMC_{(1,4)}$	$DiffAMC_{(3,3)}$	$DiffAMC_{(4,6)}$
	PER=0.0750	PER= 0.0367	PER= 0.0124
	BW=0.4432	BW= 0.4759	BW= 0.6340
Vidéo	$DiffAMC_{(2,5)}$	$DiffAMC_{(3,5)}$	$DiffAMC_{(4,8)}$
	PER=0.0913	PER=0.0589	PER=0.0238
	BW=2.0778	BW=2.2413	BW=3.2833
Données	$DiffAMC_{(2,5)}$	$DiffAMC_{(3,5)}$	$DiffAMC_{(4,6)}$
	PER=0.0647	PER=0.0290	PER=0.0173
	BW=2.2634	BW=2.5293	BW=3.4012

niveau de fiabilité dans un environnement réaliste. En effet, nous avons testé 32 niveaux DiffAMC véhiculant 3 types de trafic différents. Les résultats obtenus ont été analysés en vue de garder les niveaux les plus performants. Finalement, 3 classes de fiabilité (QoR) ont été proposées. À chaque classe, nous avons assigné un niveau DiffAMC.

CHAPITRE 6

CONCLUSION

Synthèse des travaux

Ce mémoire de maîtrise a été consacré au développement de DiffAMC, un nouveau mécanisme de différenciation de fiabilité dans un environnement sans fil. DiffAMC peut être intégré dans la couche MAC de n'importe quel système de communication, du moment que ce dernier utilise l'adaptation de la modulation et du codage (AMC). Dans un premier temps, nous avons introduit le cadre général dans lequel le mécanisme DiffAMC va évoluer. Nous avons présenté le canal sans fil à évanouissement, ainsi qu'une revue de littérature sur les techniques d'adaptation de lien en s'attardant sur l'adaptation de modulation et codage (AMC).

Par la suite, nous avons détaillé le fonctionnement du mécanisme DiffAMC, constitué de deux sous-couches de différenciation. La première sous-couche réalise une différenciation basée sur l'utilisation de plusieurs contraintes sur le taux d'erreur binaire maximal, plutôt qu'une seule contrainte dans le cas de l'AMC classique. La deuxième sous-couche effectue une différenciation basée sur l'AMC intelligent [14]. Ce dernier est une technique que nous avons développée afin de remédier à certains inconvénients de l'AMC. En effet, l'AMC intelligent est conçu pour diminuer les effets de la variation de l'état du canal entre deux mesures de SNR. La deuxième sous-couche de DiffAMC exploite l'AMC intelligent afin d'offrir plusieurs niveaux de différenciation.

Les performances des deux sous couches de différenciation ont été évaluées séparément puis conjointement en fonction du taux de perte de paquets et du débit moyen par symbole. Les résultats obtenus confirment le bon fonctionnement de DiffAMC. Afin de valider les performances de DiffAMC dans un environnement réaliste, nous avons développé une plateforme de simulation pour réseaux WiMAX. Cette plateforme est constituée du module PolyMAX [15] que nous avons conçu pour s'intégrer dans le simulateur de réseaux ns-2. La plateforme simule un réseau WiMAX supportant la prise en charge des classes de QoS du standard WiMAX, d'un canal sans fil paramétrable et du mécanisme DiffAMC. Finalement, nous avons évalué les performances de DiffAMC en utilisant notre plateforme de simulation et un ensemble de trois types de trafic, voix, vidéo et données. Les résultats obtenus ont confirmé que DiffAMC peut offrir une différenciation du niveau de fiabilité. Nous avons analysé les résultats par type de trafic afin de sélectionner les niveaux les plus efficaces. Enfin, nous avons proposé 3 classes de fiabilité basées sur DiffAMC.

Limitations

L'ensemble de notre analyse a été basée sur les résultats des simulations. Les résultats obtenus ont servi à établir le potentiel de DiffAMC. Néanmoins, ils ne peuvent pas être considérés comme des guides pratiques et prêts à l'utilisation. En effet, un déploiement de DiffAMC nécessite d'effectuer une batterie de mesures sur le terrain afin de bien choisir les paramètres et de sélectionner les niveaux les plus efficaces. Le choix des paramètres des sous-couches DiffAMC est lié à la politique de différenciation que l'opérateur souhaite mettre en place. Les schémas DiffAMC (deuxième sous-couche DiffAMC) doivent être pensés en fonction du service à offrir aux utilisateurs. Un autre aspect très important est la caractérisation du trafic. Le choix des seuils pour les classes AMC (première sous-couche DiffAMC) pourrait être grandement amélioré avec une bonne connaissance des spécificités du trafic.

Axes de recherches futures

À la lumière des résultats obtenus, deux axes de recherche peuvent être explorés. Le premier concerne l'impact de DiffAMC sur la capacité d'un système de communication. Nous savons qu'un mécanisme de différenciation de fiabilité, comme DiffAMC, est sensé améliorer la capacité, mais ce que nous ignorons c'est jusqu'à quel niveau ? En effet, ce qui compte vraiment pour un opérateur c'est la capacité de son réseau. Par conséquent, l'étude de l'impact de DiffAMC sur les régions d'admission peut amener beaucoup plus de crédibilité à DiffAMC. Une étude de ce genre pour un réseau WiMAX serait grandement facilitée par le fait que la plateforme de simulation est déjà prête. Le deuxième axe de recherche se rapporte à l'utilisation de la technique MIMO. En effet, il serait intéressant de généraliser le mécanisme DiffAMC en ajoutant un degré de liberté supplémentaire. DiffAMC peut être déployé, par exemple, en tenant compte des sous-canaux MIMO classés selon leur qualité. Ce classement est bien évidemment variable dans le temps. Les niveaux de différenciation seront alors une combinaison de DiffAMC et d'un sous-canal MIMO. Il serait intéressant d'étudier une telle combinaison surtout que DiffAMC peut réduire l'impact d'un mauvais classement des canaux.

RÉFÉRENCES

- [1] General characteristics of international telephone connections and international telephone circuits. ITU-T Recommendation G.114, 1998.
- [2] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications. *IEEE Std 802.11g-2003 IEEE Standard for Local and metropolitan area networks*, June 2003.
- [3] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications. *IEEE Std 802.11n-2009 IEEE Standard for Local and metropolitan area networks*, October 2009.
- [4] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16 : Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems. *IEEE Std 802.16TM-2009 IEEE Standard for Local and metropolitan area networks*, May 2009.
- [5] 3GPP TS 23.203. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) : Policy and charging control architecture. LTE release 8 specifications, September 2009.
- [6] 3GPP TR 25.943. Technical Specification Group Radio Access Networks : Deployment aspects (Release 10). Technical report, 3rd Generation Partnership Project, March 2011.
- [7] 3GPP TS 36.321. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) : Medium Access Control (MAC) protocol specification. LTE release 8 specifications, September 2009.
- [8] P. Agrawal, B. Narendran, J. Sienicki, and S. Yajnik. An adaptive power control and coding scheme for mobile radio systems. In *IEEE International Conference on Personal Wireless Communications*, pages 283–288, February 1996.
- [9] S.M. Alamouti and S. Kallel. Adaptive trellis-coded multiple-phase-shift keying for Rayleigh fading channels. *IEEE Transactions on Communications*, 42(6) :2305–2314, June 1994.
- [10] M.S. Alouini, X. Tang, and A. Goldsmith. An adaptive modulation scheme for simultaneous voice and data transmission over fading channels. In *48th IEEE Vehicular Technology Conference*, volume 2, pages 939–943, May 1998.
- [11] S.M. Alouini and A. Goldsmith. Adaptive Modulation over Nakagami Fading Channels. *Wireless Personal Communications*, 13 :119–143, May 2000.
- [12] C. Awad. *Pour un mécanisme de protection différenciée unique contre la congestion ainsi que les pannes : DiffServ**. PhD thesis, École Polytechnique de Montréal, 2009.

- [13] C. Awad, B. Sansò, and A. Girard. DiffServ for differentiated reliability in meshed IP/WDM networks. *Computer Networks*, 52(10):1988–2012, July 2008.
- [14] S. BenGuedria, J.F. Frigon, and B. Sansò. An Intelligent High Availability AMC Design. In *IEEE Radio Wireless Week*, Santa Clara, CA, USA, January 2012.
- [15] S. BenGuedria, B. Sansò, and J.F. Frigon. PolyMAX, a Mobile WiMAX module for the ns-2 simulator with QoS and AMC support. *Elsevier's Simulation Modelling Practice and Theory*, 19(9):2076–2101, October 2011.
- [16] S. Catreux, V. Erceg, D. Gesbert, and R.W. Heath. Adaptive modulation and MIMO coding for broadband wireless data networks. *IEEE Communications Magazine*, 40(6):108–115, June 2002.
- [17] F. Chen, C. Meiya, S. Lijun, Z. Xin, and Y. Dacheng. Research on Threshold Adjustment Algorithm in Adaptive Modulation and Coding. In *IEEE 17th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pages 1–4, September 2006.
- [18] R. Chen, K.C. Chua, B.T. Tan, and C.S. Ng. Adaptive error coding using channel prediction. In *Seventh IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'96)*, volume 2, pages 359–363, October 1996.
- [19] D. Chizhik, J. Ling, P.W. Wolniansky, R.A. Valenzuela, N. Costa, and K. Huber. Multiple-input-multiple-output measurements and modeling in Manhattan. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 21(3):321–331, April 2003.
- [20] R.H. Clarke. A statistical theory of mobile-radio reception. *Bell System Technical Journal*, 47(6):957–1000, 1968.
- [21] L-M. Correia. *Wireless Flexible Personalized Communications*. John Wiley and Sons, Inc., New York, NY, USA, 2001.
- [22] A. Duel-Hallen, S. Hu, and H. Hallen. Long-range prediction of fading signals. *Signal Processing Magazine*, 17(3):62–75, May 2000.
- [23] T. Ekman, G. Kubin, M. Sternad, and A. Ahlen. Quadratic and linear filters for radio channel prediction. In *IEEE Proceedings Vehicular Technology Conference*, volume 1, pages 146–150, September 1999.
- [24] T. Ekman, M. Sternad, and A. Ahlen. Unbiased power prediction of Rayleigh fading channels. In *IEEE Proceedings Vehicular Technology Conference*, volume 1, pages 280–284, 2002.
- [25] T. Eyceoz, S. Hu, and A. Duel-Hallen. Performance analysis of long range prediction for fast fading channels. In *Proceedings of 33rd Annual Conference on Inform. Sciences and Systems*, volume 2, pages 656–661, 1999.

- [26] S. Falahati, A. Svensson, T. Ekman, and M. Sternad. Adaptive modulation systems for predicted wireless channels. *IEEE Transactions on Communications*, 52(2) :307–316, February 2004.
- [27] F.H.P. Fitzek and M. Reisslein. MPEG-4 and H.263 video traces for network performance evaluation. *IEEE Network*, 15(6) :40–54, November 2001.
- [28] A. Forenza, M.R. McKay, A. Pandharipande, R.W. Heath, and I.B. Collings. Adaptive MIMO Transmission for Exploiting the Capacity of Spatially Correlated Channels. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 56(2) :619–630, March 2007.
- [29] A. Fumagalli and M. Tacca. Differentiated reliability (DiR) in WDM rings without wavelength converters. *IEEE International Conference on Communications*, 9 :2887–2891, 2001.
- [30] D.L. Goeckel. Adaptive coding for time-varying channels using outdated fading estimates. *IEEE Transaction on Communications*, 47(6) :844–855, June 1999.
- [31] A.J. Goldsmith and S.G. Chua. Variable-rate variable-power MQAM for fading channels. *IEEE Transaction on Communications*, 45(10) :1218–1230, October 1997.
- [32] Andrea Goldsmith. *Wireless Communications*. Cambridge University Press, New York, NY, USA, 2005.
- [33] X. Guo, R. Rouil, C. Soin, S. Parekh, B. Sikdar, and S. Kalyanaraman. WiMAX system design and evaluation methodology using the ns-2 simulator. In *Proceedings of First International Communication Systems and Networks and Workshops*, 2009.
- [34] J. Hayes. Adaptive feedback communications. *IEEE Transactions on Communication Technology*, 16(1) :29–34, February 1968.
- [35] A.T Hoang and M. Motani. Buffer and channel adaptive modulation for transmission over fading channels. In *IEEE International Conference on Communications*, volume 4, pages 2748–2752, May 2003.
- [36] Z. Hui and E.W. Knightly. Integrated and differentiated services for the internet. *IEEE Network*, 13(5) :7, 1999.
- [37] C.D. Iskander. *A MATLAB-based Object-Oriented Approach to Multipath Fading channel Simulation*. Hi-Tek Multisystems, February 2008.
- [38] W.C. Jakes. *Microwave mobile communications*. IEEE Press classic reissue. IEEE Press, 1974.
- [39] M.C. Jeruchim, P. Balaban, and K.S. Shanmugan. *Simulation of communication systems : modeling, methodology, and techniques*, chapter 9. Springer US, 2000.
- [40] C. Johnson. *Radio Access Networks for UMTS*. Wiley Online Library, 2008.

- [41] S. Kee-Bong, A. Ekbal, T.C Seong, and J.M. Cioffi. Adaptive modulation and coding (AMC) for bit-interleaved coded OFDM (BIC-OFDM). *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 5(7) :1685–1694, July 2006.
- [42] T. Keller and L. Hanzo. Adaptive multicarrier modulation : a convenient framework for time-frequency processing in wireless communications. *Proceedings of the IEEE*, 88(5) :611–640, May 2000.
- [43] V.K.N. Lau. Channel capacity and error exponents of variable rate adaptive channel coding for Rayleigh fading channels. *IEEE Transactions on Communications*, 47(9) :1345–1356, September 1999.
- [44] V.K.N. Lau and M.D. Macleod. Variable rate adaptive trellis coded QAM for high bandwidth efficiency applications in Rayleigh fading channels. In *48th IEEE Vehicular Technology Conference*, volume 1, pages 348–352, May 1998.
- [45] V.K.N. Lau and S.V. Maric. Variable rate adaptive channel coding for coherent and non-coherent Rayleigh fading channel. In *IEEE International Conference on Personal Wireless Communications*, pages 75–79, December 1997.
- [46] A. Maaref and S. Aissa. Capacity of space-time block codes in MIMO Rayleigh fading channels with adaptive transmission and estimation errors. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 4(5) :2568–2578, September 2005.
- [47] A. Misra, V. Krishnamurthy, and S. Schober. Stochastic learning algorithms for adaptive modulation. In *IEEE 6th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications*, pages 756–760, June 2005.
- [48] B. Narendran, J. Sienicki, S. Yajnik, and P. Agrawal. Evaluation of an adaptive power and error control algorithm for wireless systems. In *IEEE International Conference on Communications*, volume 1, pages 349–355, June 1997.
- [49] National Institute of Standards and Technology. *The Network Simulator NS-2 : NIST add-on - IEEE 802.16 model (MAC+PHY)*. WWW, 2009.
- [50] K. Nichols, S. Blake, F. Baker, and D. Black. RFC 2474 : Definition of the Differentiated Services Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers. IETF, December 1998.
- [51] K. Pahlavan and A.H. Levesque. *Wireless Information Networks*, chapter 3-4. John Wiley and Sons, Inc., 2005.
- [52] A. Papoulis and S.U. Pillai. *Probability, Random Variables and Stochastic Processes with Errata Sheet*. McGraw Hill Higher Education, 2002.
- [53] J.D. Parsons. *The mobile radio propagation channel*. Halsted Press, 1992.

- [54] J. Pons and J. Dunlop. Bit error rate based link adaptation for GSM. In *The Ninth IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, volume 3, pages 1530–1534, September 1998.
- [55] M. Saily, G. Sebire, and E. Riddington. *GSM/EDGE : Evolution and performance*. Wiley, 2010.
- [56] T.C. Seong and A.J. Goldsmith. Degrees of freedom in adaptive modulation : a unified view. *IEEE Transactions on Communications*, 49(9) :1561 –1571, September 2001.
- [57] H. Shatila, M. Khedr, and J.H. Reed. Adaptive modulation and coding for WiMAX systems with vague channel state information using cognitive radio. In *International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems*, pages 405–409, July 2010.
- [58] Z. Shengli and G.B. Giannakis. Adaptive modulation for multiantenna transmissions with channel mean feedback. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 3(5) :1626–1636, September 2004.
- [59] W. Stallings. *Wireless communications and networking*. Upper Saddle River, N.J. : London : Prentice Hall PTR, 2002.
- [60] D. Takeda, Y.C. Chow, P. Strauch, and H. Tsurumi. Threshold controlling scheme for adaptive modulation and coding system. In *15th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, volume 2, pages 1351–1355, September 2004.
- [61] C. Tang. An intelligent learning scheme for adaptive modulation. In *Vehicular Technology Conference*, volume 1, pages 144–148, 2001.
- [62] J. Tao and A. Duel-Hallen. Improved adaptive bit-interleaved coded modulation for mobile radio OFDM systems aided by fading prediction. In *Conference Record of the Forty-Third Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, pages 68–72, November 2009.
- [63] David Tse and Pramod Viswanath. *Fundamentals of Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005.
- [64] H.I. Volos and R.M. Buehrer. Robust Training of a link adaptation cognitive engine. In *Military Communications Conference*, pages 1442–1447, November 2010.
- [65] B. Vucetic. An adaptive coding scheme for time-varying channels. *IEEE Transactions on Communications*, 39(5) :653–663, May 1991.
- [66] W.T. Webb and R. Steele. Variable rate QAM for mobile radio. *IEEE Transactions on Communications*, 43(7) :2223–2230, July 1995.

- [67] J. Williams, I. Hanzo, and R. Steele. Channel-adaptive modulation. In *Sixth International Conference on Radio Receivers and Associated Systems*, pages 144–147, September 1995.
- [68] W. Xiaoqing, W. Jintao, and S. Jian. Efficient Rate-Adaptive Modulation for LDPC-Coded OFDM System. In *International Conference on Electrical and Control Engineering*, pages 3684–3688, June 2010.
- [69] H. Xiaozhou, W. Hsiao-Chun, and W. Yiyan. Novel Pilot-Free Adaptive Modulation for Wireless OFDM Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 57(6) :3863–3867, November 2008.
- [70] R.A. Zrae, M. Hassan, and M. El-Tarhuni. An adaptive modulation scheme for image transmission over wireless channels. In *IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology*, pages 428–432, December 2010.

ANNEXE A

INSTRUCTIONS DU SCRIPT NS-2

Affectation des variables de simulation passées en arguments

```

set seed [lindex $argv 0]           ;# entrée 1: Graine pour générateur aléatoire
set run $seed
set nb_UGS [lindex $argv 1]         ;# entrée 2: Nbr de station de voix
set nb_rtPS [lindex $argv 2]        ;# entrée 3: Nbr de station de video
set nb_BE [lindex $argv 3]          ;# entrée 4: Nbr de station de données

set e [lindex $argv 4]              ;# entrée 5: Classe AMC
set model [lindex $argv 5]          ;# entrée 6: Schéma AMC
set offset [lindex $argv 6]         ;# entrée 7: Variable offset
set range [lindex $argv 7]          ;# entrée 8: Portée d'extrapolation

```

Affectation des variables globales

```

set output_dir .                    ;# répertoire de sortie par défaut
set traffic_start 20                ;# début de trafic
set traffic_stop 80                 ;# fin de trafic
set simulation_stop 90              ;# fin de simulation

```

Paramètres WiMAX

```

WimaxScheduler/BS set dlratio_ 0.2 ;# rapport dl/ul
Mac/802_16 set queue_length_ 500   ;# taille de la file d'attente
Mac/802_16 set fbandwidth_ 20e+6    ;# largeur de la bande passante
Mac/802_16 set client_timeout_ 50   ;# temps avant déconnexion
Phy/WirelessPhy/OFDM set g_ 0.0625 ;# préfixe cyclique
set bs_sched [new WimaxScheduler/BS] ;# Création d'une instance de l'ordonnanceur

Mac/802_16 set frame_duration_ 0.005 ;# durée de la trame WiMAX
Mac/802_16 set rtg_ 10              ;# nombre de Slot entre sous-trames up et down
Mac/802_16 set ttg_ 10              ;# nombre de Slot entre sous-trames down et up
Mac/802_16 set dcd_interval_ 5      ;# intervalle entre 2 Downlink Channel Descriptor

```

```

Mac/802_16 set ucd_interval_ 5      ;# intervalle entre 2 Uplink Channel Descriptor
Mac/802_16 set init_rng_interval_ 1  ;# intervalle entre 2 ranging
Mac/802_16 set lost_dlmap_interval_ 0.6 ;# intervalle de perte de sync de DL_MAP
Mac/802_16 set lost_ulmap_interval_ 0.6 ;# intervalle de perte de sync de UL_MAP
# Affectation des Timer WiMAX
Mac/802_16 set t1_timeout_          [expr 5* [Mac/802_16 set dcd_interval_]]
Mac/802_16 set t2_timeout_          [expr 5* [Mac/802_16 set init_rng_interval_]]
Mac/802_16 set t3_timeout_          0.2
Mac/802_16 set t6_timeout_          3
Mac/802_16 set t12_timeout_         [expr 5* [Mac/802_16 set ucd_interval_]]
Mac/802_16 set t16_timeout_         0.1
Mac/802_16 set t17_timeout_         5
Mac/802_16 set t21_timeout_         0.02

Mac/802_16 set contention_rng_retry_ 16 ;# Nombre max de retransmission de RNG_MSG
Mac/802_16 set invited_rng_retry_   16 ;# Nombre max de d'invitation de RNG_MSG
Mac/802_16 set request_retry_       16 ;# Nombre max de retransmission de requêtes
Mac/802_16 set reg_req_retry_       3  ;# Nbr max de requêtes d'enregistrement
Mac/802_16 set tproc_               0.001
Mac/802_16 set dsx_req_retry_       3  ;# Nombre max de retransmission requête QoS
Mac/802_16 set dsx_rsp_retry_       3  ;# Nombre max de retransmission réponse QoS

Mac/802_16 set rng_backoff_start_   2 ;# taille min de fenetre backoff de RNG
Mac/802_16 set rng_backoff_stop_    16 ;# taille max de fenetre backoff de RNG
Mac/802_16 set bw_backoff_start_    2 ;# taille min de fenetre backoff de BW
Mac/802_16 set bw_backoff_stop_     16 ;# taille max de fenetre backoff de BW

Mac/802_16 set scan_duration_       50 ;# durée max de balayage du canal
Mac/802_16 set interleaving_interval_ 50 ;# intervalle d'entrelassement
Mac/802_16 set scan_iteration_      2  ;# Nombre de tentative de balayage
Mac/802_16 set t44_timeout_         0.1 ;# timer t44
Mac/802_16 set max_dir_scan_time_   0.2 ;# temps max pour scanner les BS adjacents
Mac/802_16 set scan_req_retry_      3  ;# Nbr max de requêtes

```

Paramètres des noeuds sans fil

```

set opt(netif)          Phy/WirelessPhy/OFDM          ;# network interface type

```

```

set opt(mac)           Mac/802_16/BS           ;# MAC type
set opt(ifq)           Queue/DropTail/PriQueue ;# interface queue type
set opt(ll)            LL                      ;# link layer type
set opt(ant)           Antenna/OmniAntenna     ;# antenna model
set opt(ifqlen)        50                      ;# max packet in ifq 50
set opt(adhocRouting)  DSDV                    ;# routing protocol
set opt(x) 1100         ;# X dimension of the topography
set opt(y) 1100         ;# Y dimension of the topography

```

Définir la fonction de désallocation et de fermeture des fichiers

```

proc finish {} {
    global ns tf output_dir nb_mn traffic_file
    $ns flush-trace
    close $tf
close $traffic_file
exit 0
}

```

Création d'une instance du simulateur

```

set ns [new Simulator]
$ns use-newtrace

```

Création de la topologie sans fil

```

set topo [new Topography]
$topo load_flatgrid $opt(x) $opt(y)
puts "Topology created"

```

Ouverture du fichier trace de ns-2

```

set tf [open $output_dir/out.res w]
$ns trace-all $tf
puts "Output file configured"

```

Mis en place de la hiérarchie de routage : nécessaire pour l'acheminement vers la station de base.

```
puts "start hierarchical addressing"
$ns node-config -addressType hierarchical
AddrParams set domain_num_ 2           ;# Nombre de domaine
lappend cluster_num 1 1                 ;# Nombre de cluster pour chaque domaine
AddrParams set cluster_num_ $cluster_num
lappend eilastlevel 1 [expr ($nb_mn+1)] ;# Nombre de noeuds pour chaque cluster
                                           (1 pour le noeud sink
                                           1 pour la station mobile
                                           1 pour la station de base)
AddrParams set nodes_num_ $eilastlevel
puts "Configuration of hierarchical addressing done"
```

Création de l'objet God (General Operation Director) Cet objet est responsable d'enregistrer tous les événements survenus.

```
create-god [expr ($nb_mn + 2)] ;# nb_mn + 2 (base station and sink node)
puts "God node created"
```

Création du noeud Sink :

```
set sinkNode [$ns node 0.0.0]
$sinkNode set X_ 501.0
$sinkNode set Y_ 500.0
$sinkNode set Z_ 0.0
puts "sink node created"
```

Création et configuration de la station de base (BS)

```
$ns node-config -adhocRouting $opt(adhocRouting) \
                -llType $opt(ll) \
                -macType Mac/802_16/BS \
                -ifqType $opt(ifq) \
                -ifqLen $opt(ifqlen) \
                -antType $opt(ant) \
```

```

        -propType $opt(prop) \
        -phyType $opt(netif) \
        -channel [new $opt(chan)] \
        -topoInstance $topo \
        -wiredRouting ON \
        -agentTrace ON \
        -routerTrace ON \
        -macTrace ON \
        -movementTrace OFF
set bstation [$ns node 1.0.0]
$bstation random-motion 0
$bstation set X_ 500.0
$bstation set Y_ 500.0
$bstation set Z_ 0.0
[$bstation set mac_(0)] set-channel 0

```

Création du modèle de base des station mobiles

```

$ns node-config -macType Mac/802_16/SS \
        -wiredRouting OFF \
        -macTrace ON ;# les station mobiles ne peuvent pas faire de routage

```

Initialisation des générateurs aléatoires

```

for {set j 0} {$j< $nb_mn} {incr j} {
    set diffRNG($j) [new RNG]
    set snrRNG($j) [new RNG]
}

for {set j 1} {$j<=$run} {incr j} {
    for {set i 0} {$i< $nb_mn} {incr i} {
        $diffRNG($i) next-substream
        $snrRNG($i) next-substream
    }
}

for {set i 0} {$i< $nb_mn} {incr i} {
    # start traffic distribution law
    set diff($i) [new RandomVariable/Exponential]
}

```

```

$diff($i) use-rng $diffRNG($i)
$diff($i) set avg_ 1.5

# snr distribution law
set newsnr($i) [new RandomVariable/Normal]
$newsnr($i) use-rng $snrRNG($i)
$newsnr($i) set avg_ $average_SNR
$newsnr($i) set std_ $deviation_SNR
}

```

Création et configuration des stations utilisant des connexions UGS (voix)

```

for {set i 0} {$i < $nb_UGS} {incr i} {
set wl_node_($i) [$ns node 1.0.[expr $i + 1]];# créer un noeud avec cette @
$wl_node_($i) random-motion 0 ;# désactiver la mobilité
;#attach mn to basestation Attacher la SS et la BS
$wl_node_($i) base-station [AddrParams addr2id [$bstation node-addr]]

$wl_node_($i) set X_ [expr 340.0] ;##calculer la position du noeud
$wl_node_($i) set Y_ 550.0
$wl_node_($i) set Z_ 0.0
$ns at 0 "$wl_node_($i) setdest 1060.0 550.0 1.0"
puts "wireless node $i created ..."

#Création de la source de trafic
#-----

#Créer un agent UDP et l'attacher au noeud mobile

set udp_($i) [new Agent/UDP]
$udp_($i) set packetSize_ 10000
$ns attach-agent $wl_node_($i) $udp_($i)

# Créer un trafic CBR et l'attacher à l'agent UDP

set cbr_($i) [new Application/Traffic/CBR]
$cbr_($i) set packetSize_ 60

```



```

$cbr_($i) set interval_ 0.01
$cbr_($i) attach-agent $udp_($i)

# Créer un agent Null pour recevoir le trafic

set null_($i) [new Agent/Null]
$ns attach-agent $sinkNode $null_($i)

# Attacher les 2 agents
$ns connect $udp_($i) $null_($i)

# Paramètres de SERVICE FLOW (QoS)
# -----

set MaxRateUGS 80000 ;# capacité à allouer
set PeriodeUGS 2 ;# périodicité
set ugs_ [expr ($MaxRateUGS/8)*$PeriodeUGS*$frame_duration]
puts ugs_=$ugs_
[$wl_node_($i) set mac_(0)] add-ServiceFlow 1 6 $ugs_ 0 0 0 0 $PeriodeUGS 0

# Paramètres du CANAL SANS FIL
# -----

# Définir le répertoire des MCS

[$wl_node_($i) set mac_(0)] set-mcs-folder ...
/tmp/ns-allinone-2.34/ns-2.34/wimax/wimax_mcs/

# Définir le fichier canal

set wl_node_adr [expr $i + 1]
$bs_sched set-CHN $wl_node_adr ...
/tmp/ns-allinone-2.34/ns-2.34/tcl/wimax/channel/channel_3gppTux$seed.chn

# Définir le paramètres DiffAMC
# -----

```

```

set AMC_e $e;
set AMC_model $model;
set AMC_offset $offset;
set AMC_range $range;
$bs_sched set-diffAMC $wl_node_adr $AMC_e $AMC_model $AMC_offset $AMC_range

}

```

Création et configuration des stations utilisant des connexions rtPS (MPEG-4)

```

for {set i $nb_UGS} {$i < [expr $nb_UGS+$nb_rtPS] } {incr i} {
set wl_node_($i) [$ns node 1.0.[expr $i + 1]];# créer un noeud avec cette @
$wl_node_($i) random-motion 0      ;# désactiver la mobilité
;#attach mn to basestation Attacher la SS et la BS
$wl_node_($i) base-station [AddrParams addr2id [$bstation node-addr]]

$wl_node_($i) set X_ [expr 340.0] ;##calculer la position du noeud
$wl_node_($i) set Y_ 550.0
$wl_node_($i) set Z_ 0.0
$ns at 0 "$wl_node_($i) setdest 1060.0 550.0 1.0"
puts "wireless node $i created ..." ;# debug info

#Création de la source de trafic
#-----

#Créer un agent UDP et l'attacher au noeud mobile

set udp_($i) [new Agent/UDP]
$udp_($i) set packetSize_ 10000
$ns attach-agent $wl_node_($i) $udp_($i)

# Créer un agent Null pour recevoir le trafic

set null_($i) [new Agent/Null]
$ns attach-agent $sinkNode $null_($i)

```

```

# Attacher les 2 agents
$ns connect $udp_($i) $null_($i)

# Paramètres de SERVICE FLOW (QoS)
# -----

set MaxRatertPS 1024000 ;# capacité à allouer
set PeriodertPS 6 ;# périodicité
set ugs_ [expr ($MaxRatertPS/8)*$PeriodertPS*$frame_duration]
puts rtPS_=$rtPS_
[$wl_node_($i) set mac_(0)] add-ServiceFlow 1 4 $rtPS_ 0 0 0 0 $PeriodertPS 0

# Paramètres du CANAL SANS FIL
# -----

# Définir le répertoire des MCS
[$wl_node_($i) set mac_(0)] set-mcs-folder ...
/tmp/ns-allinone-2.34/ns-2.34/wimax/wimax_mcs/

# Définir le fichier canal
set wl_node_adr [expr $i + 1]
$bs_sched set-CHN $wl_node_adr ...
/tmp/ns-allinone-2.34/ns-2.34/tcl/wimax/channel/channel_3gppTux$seed.chn

# Définir le paramètres DiffAMC
# -----

set AMC_e $e;
set AMC_model $model;
set AMC_offset $offset;
set AMC_range $range;
$bs_sched set-diffAMC $wl_node_adr $AMC_e $AMC_model $AMC_offset $AMC_range

}

```

Création et configuration des stations utilisant des connexions BE (données)

```

for {set i [expr $nb_UGS+$nb_rtPS]} {$i < $nb_mn} {incr i} {
set wl_node_($i) [$ns node 1.0.[expr $i + 1]];# créer un noeud avec cette @
$wl_node_($i) random-motion 0      ;# désactiver la mobilité
;#attach mn to basestation Attacher la SS et la BS
$wl_node_($i) base-station [AddrParams addr2id [$bstation node-addr]]

$wl_node_($i) set X_ [expr 340.0] ;##calculer la position du noeud
$wl_node_($i) set Y_ 550.0
$wl_node_($i) set Z_ 0.0
$ns at 0 "$wl_node_($i) setdest 1060.0 550.0 1.0"
puts "wireless node $i created ..."

#Création de la source de trafic
#-----

#Créer un agent UDP et l'attacher au noeud mobile

set udp_($i) [new Agent/UDP]
$udp_($i) set packetSize_ 10000
$ns attach-agent $wl_node_($i) $udp_($i)

# Créer un trafic CBR et l'attacher à l'agent UDP

set cbr_($i) [new Application/Traffic/CBR]
$cbr_($i) set packetSize_ 1500
$cbr_($i) set interval_ 0.01
$cbr_($i) attach-agent $udp_($i)

# Créer un agent Null pour recevoir le trafic

set null_($i) [new Agent/Null]
$ns attach-agent $sinkNode $null_($i)

# Attacher les 2 agents

$ns connect $udp_($i) $null_($i)

```

```

# Paramètres du CANAL SANS FIL
# -----

# Définir le répertoire des MCS

[wl_node_($i) set mac(0)] set-mcs-folder ...
/tmp/ns-allinone-2.34/ns-2.34/wimax/wimax_mcs/

# Définir le fichier canal

set wl_node_adr [expr $i + 1]
$bs_sched set-CHN $wl_node_adr ...
/tmp/ns-allinone-2.34/ns-2.34/tcl/wimax/channel/channel_3gppTux$seed.chn

# Définir le paramètres DiffAMC
# -----

set AMC_e $e;
set AMC_model $model;
set AMC_offset $offset;
set AMC_range $range;
$bs_sched set-diffAMC $wl_node_adr $AMC_e $AMC_model $AMC_offset $AMC_range

}

```

Création de la topologie filaire : un lien d'une capacité de 100Mb entre la station de base et le routeur.

```
$ns duplex-link $sinkNode $bstation 100Mb 1ms DropTail ; #
```

Procédures d'enclenchement des trafics

```
# Procédure d'enclenchement du trafic de voix
```

```
-----
```

```
for {set i 0} {$i < $nb_UGS} {incr i} {
```

```

    set j [expr $i+1]
    set t $j*[$diff($i) value]
    $ns at [expr $traffic_start+$j*[$diff($i) value]] "$cbr_($i) start"
    $ns at [expr $traffic_stop+$j*[$diff($i) value]] "$cbr_($i) stop"
    puts [$diff($i) value]
}

```

Procédure d'enclenchement du trafic de vidéo

```

-----
for {set i $nb_UGS} {$i < [expr $nb_UGS+$nb_rtPS]} {incr i} {
    set j [expr $i+1]
    $ns at [expr $traffic_start+$j*[$diff($i) value]] "sendpacket $i"
    puts [$diff($i) value]
}

```

```

set traffic_file [open Terse_Jurassic.dat r]; # 33ms inter
set interArrival [expr 1.0/30.0]
puts $interArrival

```

Procédure de lecture du fichier trace

```

-----
proc sendpacket {arg1} {
    global ns udp_ traffic_file interArrival
    if {[eof $traffic_file]} {
        $ns at [$ns now] "finish"
    } else {
        gets $traffic_file current_line
        scan $current_line "%d" bytes
        set time [$ns now]
        $ns at [expr $time + $interArrival] "sendpacket $arg1"
        $udp_($arg1) send $bytes
        puts "VideoPkt size = $bytes "
    }
}

```

Procédure d'enclenchement du trafic de données

```
for {set i [expr $nb_UGS+$nb_rtPS]} {$i < $nb_mn} {incr i} {  
    set j [expr $i+1]  
    set t $j*[$diff($i) value]  
    $ns at [expr $traffic_start+$j*[$diff($i) value]] "$cbr_($i) start"  
    $ns at [expr $traffic_stop+$j*[$diff($i) value]] "$cbr_($i) stop"  
    puts [$diff($i) value]  
}
```

Démarrage et arrêt du simulateur

```
$ns at $simulation_stop "finish"  
$ns run  
puts "Simulation done."
```